

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL
ENGINEERING

BEZKONTAKTNÍ MĚŘENÍ V PROCESNÍM **INŽENÝRSTVÍ**

CONTACTLESS MEASURING IN PROCESS ENGINEERING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. JIŘÍ LAVICKÝ

VEDOUČÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. ZDENĚK NĚMEC, CSc.

BRNO 2010

Abstrakt

Cílem mé diplomové práce je popis bezkontaktních metod měření, jejich princip a rozdělení. Jsou zde zpracována fakta o měření laserem a ultrazvukem. V této práci je také popsáno bezkontaktní měření teploty. Součástí diplomové práce je také bezkontaktní měření průtoku na modelovém zařízení.

Klíčová slova:

bezkontaktní měřicí metody, laser, ultrazvuk, teplota

Abstract

The objective of my thesis is description of contactless measuring methods, their principle and distribution. There are compiled basic facts about the measurement of laser and ultrasound. In this work is also described non-contact temperature measurement. Part of thesis is non-contact flow measurement on the model.

Keywords:

contactless measuring methods, laser, ultrasound, temperature

LAVICKÝ, J. *Bezkontaktní měření v procesním inženýrství*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2010. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Zdeněk Němec, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Bezkontaktní měření v procesním inženýrství vypracoval samostatně za použití pramenů uvedených v přehledu literatury.

V Brně dne

Podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňku Němcovi, CSc. za odborné vedení, rady a připomínky, které mi poskytl během řešení diplomové práce.

Obsah

1	Úvod	3
2	Laser Doppler Anemometry	4
2.1	Úvod do LDA.....	4
2.2	Dopplerův efekt.....	7
2.3	Princip LDA	9
2.4	Odvození rovnic pro LDA.....	10
3	Bezdotykové měření teploty	13
3.1	Úvod do bezdotykového měření teploty	13
3.2	Teorie za bezdotykovým měřením teploty	14
3.3	Rozdělení pyrometrů.....	16
3.4	Pyrometry.....	17
3.4.1	Dvoupásmové pyrometry.....	17
3.4.2	Úhonné pyrometry.....	19
3.4.3	Pásmové pyrometry	20
3.4.4	Jasové pyrometry	20
3.5	Termovize.....	22
3.5.1	Systémy s rozkladem obrazu	23
3.5.2	Systémy bez rozkladu obrazu	23
4	Měření ultrazvukem	24
4.1	Úvod do měření ultrazvukem.....	24
4.1.1	Metoda sing – around	24
4.1.2	Metoda ultrazvukového dopplerovského měření.....	25
4.1.3	Metoda ultrazvukového diferenčního měření	27
4.2	Uspořádání senzorů při měření průtoku v korytech	28
4.2.1	Jednocestný systém	29
4.2.2	Křížový systém.....	30
4.2.3	Systém s responderem.....	31
4.2.4	Systém s reflektorem	32
4.2.5	Víceúrovňový systém	32
4.2.6	Výpočet výsledné rychlosti.....	33
4.2.7	Výpočet průtoku.....	34
4.3	Měření průtoku v potrubí.....	35

4.4	Ultrazvukové měření výšky hladiny.....	36
4.5	Ultrazvukové měření hladiny přes stěnu nádoby	38
5	Měření radarem	40
5.1	Rozdělení radarů	41
6	Praktická část.....	44
6.1	Popis Venturiho žlabu	44
6.2	Odvození rovnice pro Venturiho žlab.....	45
6.3	Popis modelu Venturiho žlabu	47
6.4	Popis měřících přístrojů.....	48
6.5	Postup měření	49
6.6	Zhodnocení výsledků.....	55
7	Závěr.....	56
8	Seznam použité literatury	57
9	Seznam použitých symbolů.....	58

1 Úvod

S rychlým rozvojem všech technologií získávají bezkontaktní metody měření stále větší oblibu. V mnoha oblastech se ukazuje výhodnější změřit danou veličinu bez kontaktu s měřeným médiem a tím snížit ovlivnění výsledků. Tyto metody nacházejí zejména uplatnění při měření v místech, kde by to dříve bylo jen velmi obtížné. Zejména rozvoj LDA nám umožňuje díky svým vlastnostem lépe porozumět průběhům rychlostí v aplikacích, kde vysoký tlak, teplota a agresivní prostředí znemožňovali použití běžných měřících přístrojů.

S postupem času jak se bezkontaktní měřící metody zdokonalují a je snaha jimi nahrazovat klasické měřící zařízení. Nové uplatnění se objevují zejména tam, kde chceme zamezit kontaktu měřiče s měřeným prostředím. Bezdotykové měřící metody také díky svému provedení zatěžují daný systém velmi malými tlakovými ztrátami a vykazují velkou odolnost proti poškození a zanášení.

Bezdotykové měřící metody také nalézají uplatnění tam, kde je kladen velký důraz na čistotu a hrozí nebezpečí kontaminace zpracovávaného materiálu. Je zřejmé, že se v budoucnu bude použití bezkontaktních měřících metod i nadále rozšiřovat.

2 Laser Doppler Anemometry

2.1 Úvod do LDA

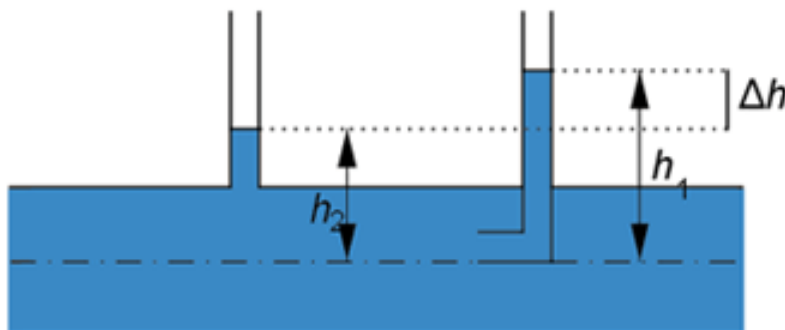
Po mnoho let byly pro měření rychlosti v mechanice tekutin využívány mechanické měřicí metody. Mezi klasické způsoby patří různé druhy vodoměrných vrtulí, pro změření střední rychlosti se používalo Pitotových a Prandtlových trubic. Pro změření okamžitých rychlostí se pracovalo s modernějšími žhavými sondami hot – wire a hot – film anemometry. [1]

Vodoměrné vrtule pracují na principu snímání počtu časových impulzů. Její velikosti se pohybují přibližně od 8 mm do 250 mm, přičemž její velikost a tvar se volí dle daných požadavků. Rozsah měřených rychlostí je asi od 0,1 do 10 m/s. Přičemž mikrovrtuli lze při měření rychlosti vzduchu použít až do rychlosti 40 m/s. Vrtule dokážou registrovat pulzaci proudu do 5 Hz, v laboratorních podmínkách pak do 20 Hz. [2]



Obr.2-1 Univerzální vodoměrná vrtule

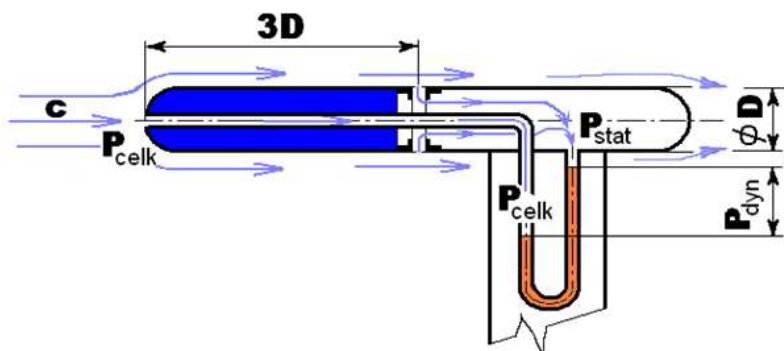
Pitotovy a Prandtlovy trubice umožňují měření rychlosti proudící kapaliny nebo plynu jejím převedením na tlak, kde využívají rozdíl mezi tlakem celkovým a tlakem statickým. Jednou z nevýhod těchto trubice je, že musejí být pro přesné měření orientovány s relativně malou odchylkou.



rychlost proudění c :

$$c = \sqrt{\frac{2g(h_1 - h_2)}{\rho}}$$

Obr. 2-2 Principiální uspořádání Pitotovy trubice



rychlost proudění c :

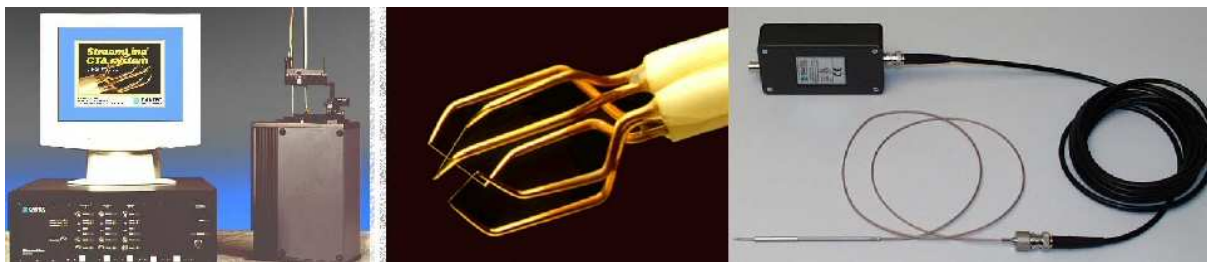
$$P_{celk} = P_{stat} + P_{dyn}$$

$$P_{dyn} = \frac{c^2}{2g} \cdot \rho$$

$$c = \sqrt{\frac{P_{dyn} \cdot 2g}{\rho}}$$

Obr. 2-3 Principiální uspořádání Prandtlovy trubice

Již moderní způsobem měření je metoda žhavené sondy, mezinárodně nazývaná Constant Temperature Anemometry (CTA) nebo také jako Hot – wire a hot – film anemometr. Sondy pracují tak, že dochází k vystavení malého elektricky zahřívaného drátku proudícímu médiu. Tento drátek je zahříván na poměrně vysokou teplotu a je daným médiem ochlazován. Rezistence drátku závisí na jeho teplotě, přičemž řídicí elektronika sondy se snaží, aby rezistence (teplota) byla konstantní. To se dosahuje tím, že dochází ke zvýšení napětí. Se zvyšující se rychlostí proudícího média dochází také k nárůstu napětí. Ty nejkvalitnější sondy dokážou reagovat na změnu rychlosti média s frekvencí od 300 do 500 kHz. [1], [2]



Obr. 2-4 Wolframový hot – wire senzor

I přestože v současnosti jsou mechanické sondy stále užitečným nástrojem, mají mnoho omezení. Sondy samotné je totiž nutno ponořit do média, čímž dojde k narušení jeho proudu. Přestože Constant Temperature Anemometry (CTA) nám poskytují velké množství informací, je jejich použití limitováno tím, že jsou schopny pracovat pouze v nízkoteplotním, nízkotlakovém a nízkoturbulentním prostředí. Odpovědí na tyto nedostatky byla snaha vyvinout bezdotykovou optickou metodu a tou je laserová Dopplerová anemometrie, zkráceně LDA. [3]

2.2 Dopplerův efekt

Jde o jev, který souvisí se změnou frekvence a vlnové délky přijímaného oproti vysílanému signálu, což je způsobenou nenulovou vzájemnou rychlostí vysílače a přijímače. Tento jev byl poprvé popsán Christianem Dopplerem v roce 1842 v monografii *Über das farbige Licht der Doppelsterne und einige andere Gestirne des Himmels*. [4]

Díky tomu efektu můžeme měřit rychlost pohybující částice tak, že paprsek odraženého laseru bude mít změněnou vlnovou délku a to úměrně k rychlosti pohybující částice. Rychlost částice lze vypočítat dle jednoduchého vztahu níže. [4]

$$v = c[1 - (\lambda_i / \lambda_o)]$$

v = rychlost částice

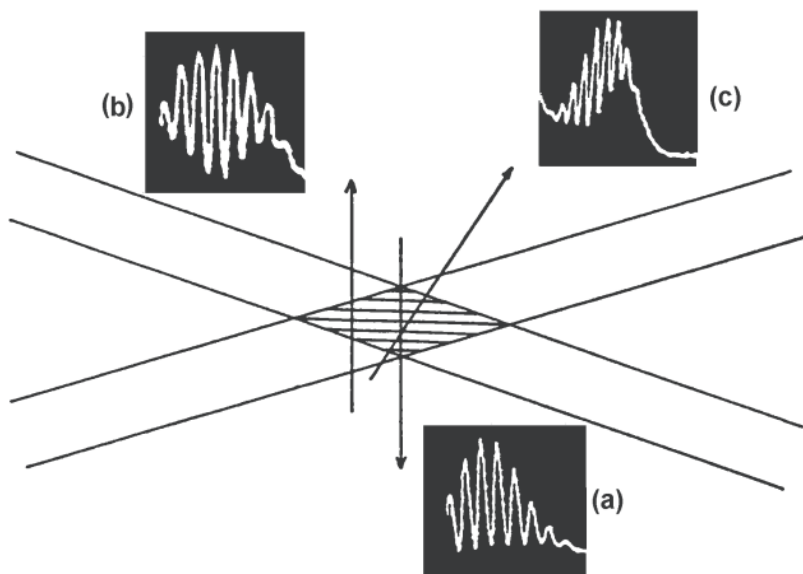
c = rychlost světla

λ_i = vlnová délka laserového paprsku

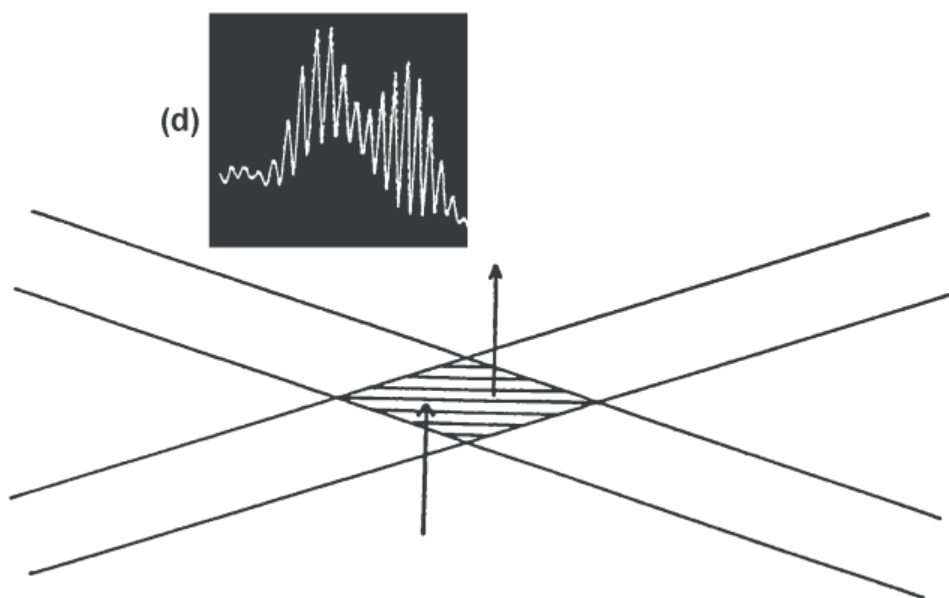
λ_o = vlnová délka odraženého paprsku od částice

Co se dopplerovského signálu týče, rozeznáváme jeho základní čtyři typy:

- (a) Symetrický dopplerovský signál s přibližně gaussovskou obálkou, který vzniká při průletu částice v centrální rovině optické sondy.
 - (b) Průběh signálu při průletu částice v některé z rovin paralelních k rovině centrální
 - (c) Při šikmém průletu částice je dopplerovský signál asymetrický
 - (d) Při průletu dvou částic za sebou se dopplerovské signály mohou částečně překrývat
- [5]

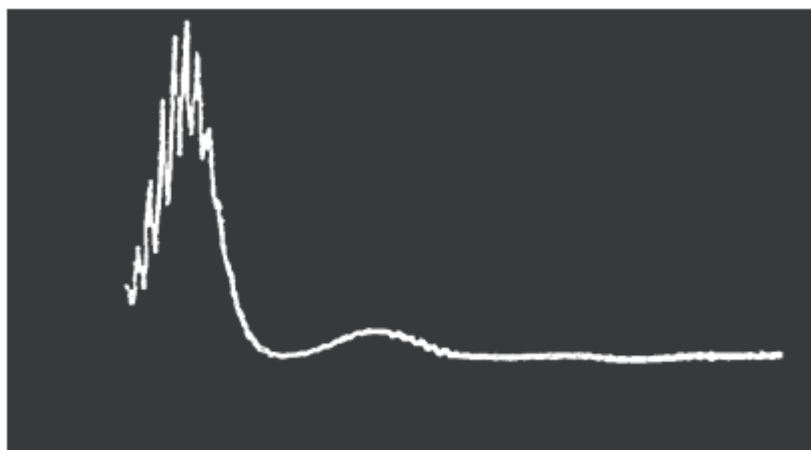


Obr. 2-5 Hlavní typy dopplerovského signálu



Obr. 2-6 Hlavní typy doplerovského signálu

Při měření frekvence vyhodnocujte jen signály typu (a). Rovněž nevyhodnocujeme signály s velmi malou hloubkou modulace, vznikající na velmi velkých částicích, viz obrázek níže.



Obr. 2-7 Signál s malou hloubkou modulace

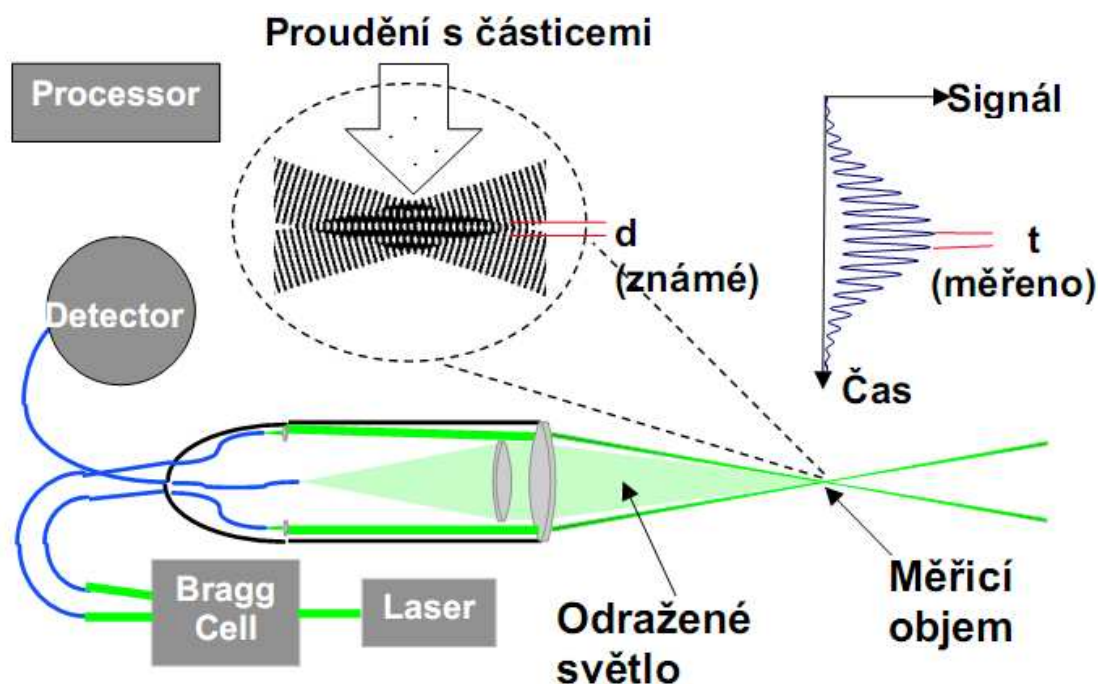
2.3 Princip LDA

LDA neboli laser Doppler anemometry byla vynalezena v roce 1964 pány Yeh a Cummings. Do praxe se pak dostala v roce 1970. Mezi hlavní klady této metody patří. Je to bezkontaktní optická metoda, dokáže měřit až tři složky rychlosti, je vysoce přesná, má vysoké prostorové rozlišení (dokáže změřit rychlost prakticky v jednom bodě), jedná se o absolutní způsob měření, tedy není třeba provádět kalibraci. Dokáže měřit i záporné a nulové rychlosti, dovede rozlišit i fluktuaci rychlosti v řádu kHz. [1], [2]

Jako každá metoda není ani tato dokonalá. Pro svou funkci potřebuje stopovací částice, přesto i běžná kohoutková voda má dostatek částic pro měření za pomoci LDA. Další nevýhodou je nepravidelnost vzorkování. [1], [2]

Mezi nejčastější uplatnění metody LDA patří měření laminárního a turbulentního proudění, výzkumy v aerodynamice a supersonickém proudění. Má uplatnění v automobilovém průmyslu, při měření rychlosti a kmitání povrchů a také je použitelná při práci v horkých prostředích, jako jsou plazma a plameny. [1], [2]

Metoda LDA funguje tak, že nejprve je laserový paprsek rozdělen na paprsky o stejné intenzitě. Paprsky jsou pak nasměrovány do optických vláken, odkud jsou vedeny do optiky sondy. Ohnisková vzdálenost předních čoček sondy určuje velikost a pozici bodu křížení obou paprsků. Optika je použita k nasměrování paprsků do místa, ve kterém chceme provádět měření. Zkřížením paprsků se nám vytváří měřicí objem ve tvaru elipsoidu, kde dochází ke vzniku interferenčních proužků. Mezery mezi proužky jsou dány vlnovou délkou laseru a úhlem mezi oběma paprsky. V proudu média jsou obsaženy drobné částice. Když tyto částice projdou skrz měřený objem, dojde k rozptylu světla dle Dopplerova efektu. Kolísání síly rozptýleného světla pak závisí na velikosti rychlosti pohybující se částice. Poté se poměrně snadno dá vypočíst rychlost částice z jednotky času, za kterou částice překoná vzdálenost mezi interferenčními proužky. [1], [2], [6]



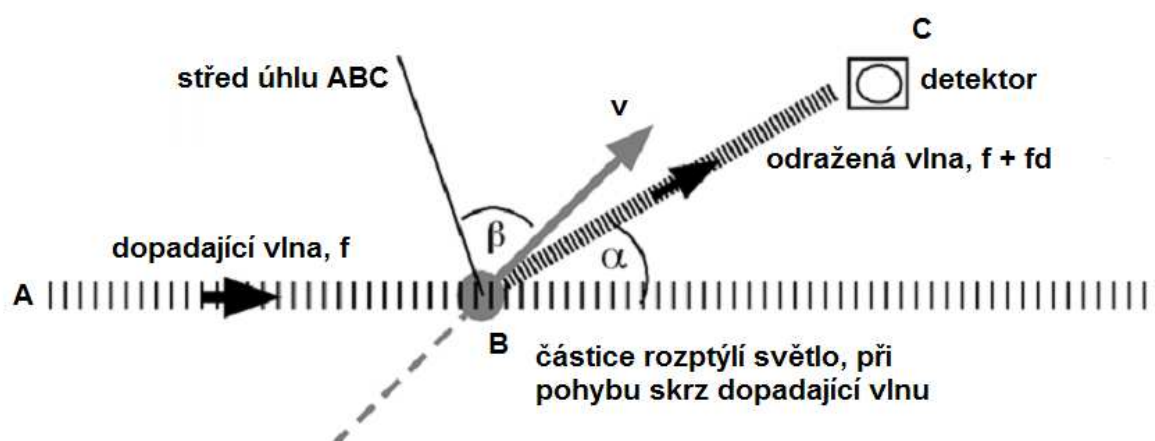
Obr. 2-8 Princip Laser Doppler anemometry

2.4 Odvození rovnic pro LDA

Velikost dopplerova frekvenčního posunu závisí na rychlosti a směru pohybu částice, vlnové délce světla a místu detektoru. Orientace detektoru je dána úhlem α mezi paprskem a detektorem. Směr částice je určen úhlem β , tento úhel je mezi rychlostním vektorem částice a středem úhlu mezi paprskem a detektorem. [7]

$$f_d = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cos \beta \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

Toto uspořádání je ukázáno na obrázku níže.



Obr. 2-9 Orientace detektoru

Přímou metodou jak zjistit frekvenci f_d je porovnat frekvenci dopadajícího a odraženého paprsku a porovnat rozdíl. Protože je dopplerovská frekvence malá v porovnání s původní vlnou, může být tento proces poněkud nepřesný. Jako vylepšení je použito dvou paprsků. V této konfiguraci je původní paprsek rozdělen na dva o stejné intenzitě. Tyto paprsky jsou zaměřeny tak aby se zkřížily. Toto místo setkání paprsků je měřící objem, kterým probíhající částice rozptyluje světlo z obou paprsků. [7]

Dopplerovská frekvence je z obou rozptýlených paprsků různá z důvodu rozdílné orientace paprsků oproti detektoru a paprsků oproti vektoru rychlosti částice. Protože frekvence f_{d1} a f_{d2} jsou obě mnohem menší než frekvence f , mají odražené paprsky téměř shodnou frekvenci. Proto vznikne interference a výsledná amplituda bude periodicky stoupat a klesat. Frekvence je pak polovina rozdílu mezi původními frekvencemi, $|f_{d1} - f_{d2}|/2$, což je dopplerova frekvence, kterou hledáme. [7]

Dle obrázku níže je pak dopplerova frekvence:

$$f_{d1} = \left(\frac{2 \cdot v}{\lambda} \right) \cos(-\theta/4) \sin(-\theta/4)$$

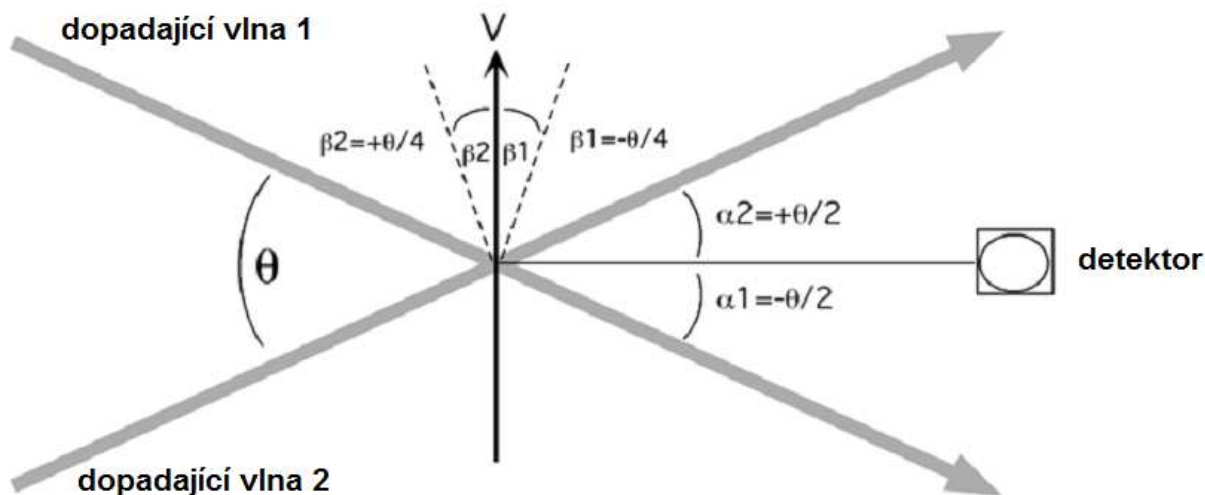
A pro druhý paprsek pak:

$$f_{d2} = \left(\frac{2 \cdot v}{\lambda} \right) \cos(\theta/4) \sin(\theta/4)$$

Protože $\sin(-\alpha) = -\sin(\alpha)$ a $\cos(-\alpha) = \cos(\alpha)$ vyplývá, že $f_{d1} = -f_{d2}$. Dopplerova frekvence je pak dána:

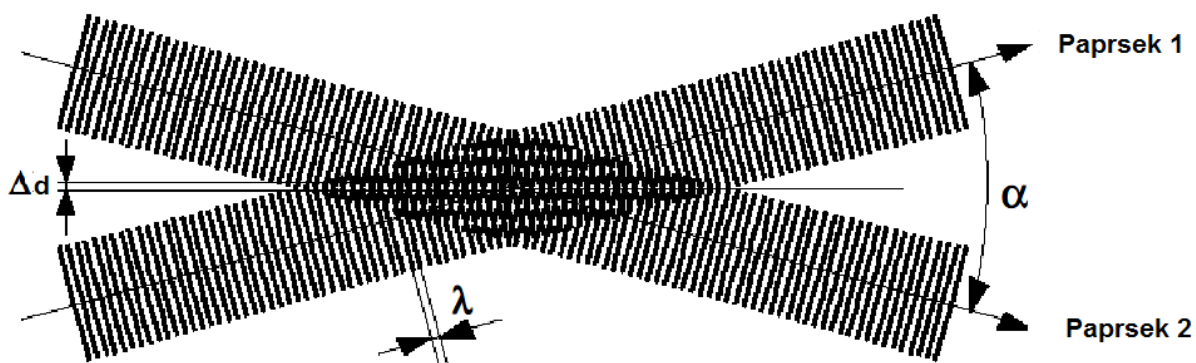
$$\frac{|f_{d1} - f_{d2}|}{2} = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \cos(\theta/4) \sin(\theta/4) = \frac{2 \cdot v}{\lambda} \sin(\theta/2)$$

Tento výsledek je stejný pro jakékoli α , β a θ jestliže je rychlost kolmá na střed úhlu mezi paprsky. [7]



Obr. 2-10 Konfigurace paprsků a detektoru

Další možnosti interpretace signálu, který je zaznamenáván detektorem, je tvar interferenčního obrazce. Zkoumáme pak vzdálenost Δd mezi tmavými a světlými proužky jak je ukázáno níže. [7], [11]



Obr. 2-11 Interferenční obrazec

Vzdálenost Δd se pak vypočítá ze vztahu:

$$\Delta d = \frac{\lambda}{2 \cdot \sin \alpha / 2}$$

Při průletu částice interferenčním obrazcem dochází ke změně amplitudy, která je úměrná rychlosti částice prolétávající kolmo na obrazec. Výsledná změna frekvence je pak stejná jako dopplerova:

$$\frac{v}{\Delta d} = \frac{2 \cdot V}{\lambda} \sin(\theta/2)$$

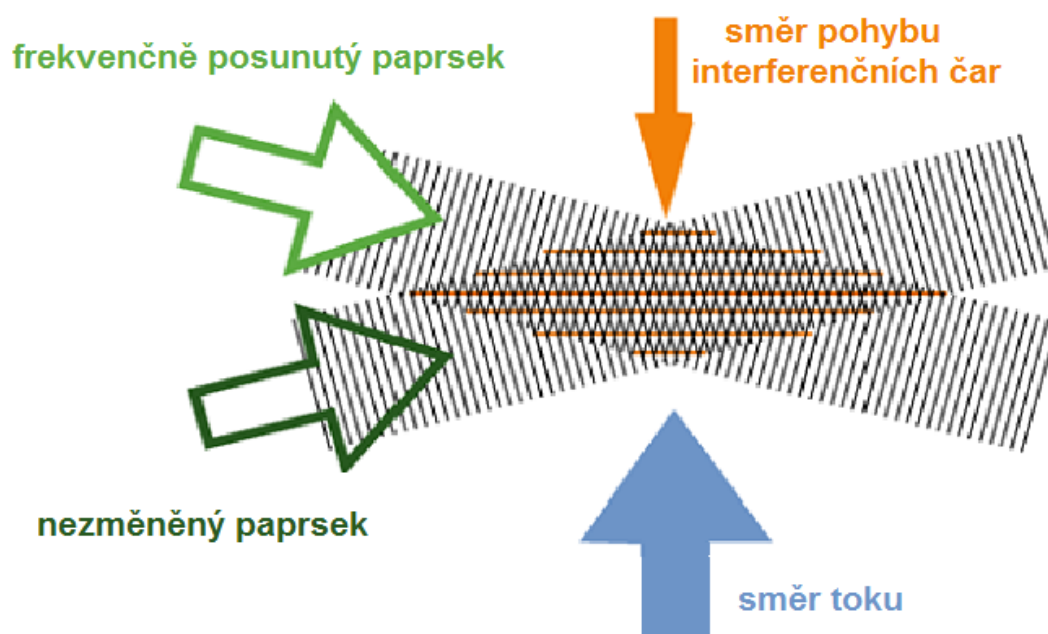
Ze vzorců pro výpočet dopplerovy frekvence je patrné, že velikost f_d závisí pouze na velikosti rychlosti částice a ne směru. Aby bylo možno zjistit, zda je měřená rychlost pozitivní nebo negativní je frekvence jednoho příchozího paprsku změněna o známou velikost f_s . To způsobí, že dojde k pohybu čar v interferenčním obrazci. Tyto čáry se budou pohybovat rychlostí $V_s = f_s \cdot \Delta d$ k původnímu nezměněnému paprsku. Frekvenci, kterou teď detektor zaznamenává je: [7]

$$f_d = \left| f_s + \frac{2 \cdot V}{\lambda} \sin(\theta/2) \right|$$

Nyní dochází k tomu, že detekovaná frekvence f_d je zvětšována nebo zmenšována v závislosti na směru rychlosti. Přičemž musí platit:

$$f_s > \left| (2V/\lambda) \sin(\theta/2) \right|$$

Ze vzorce pro frekvenční posun je patrné, že jeho velikost závisí na rychlosti proudění. Příslušný posun generuje opticky – akustické zařízení zvané Braggova cella. Směr pohybu interferenčních obrazců je zobrazen na obrázku níže. [7]



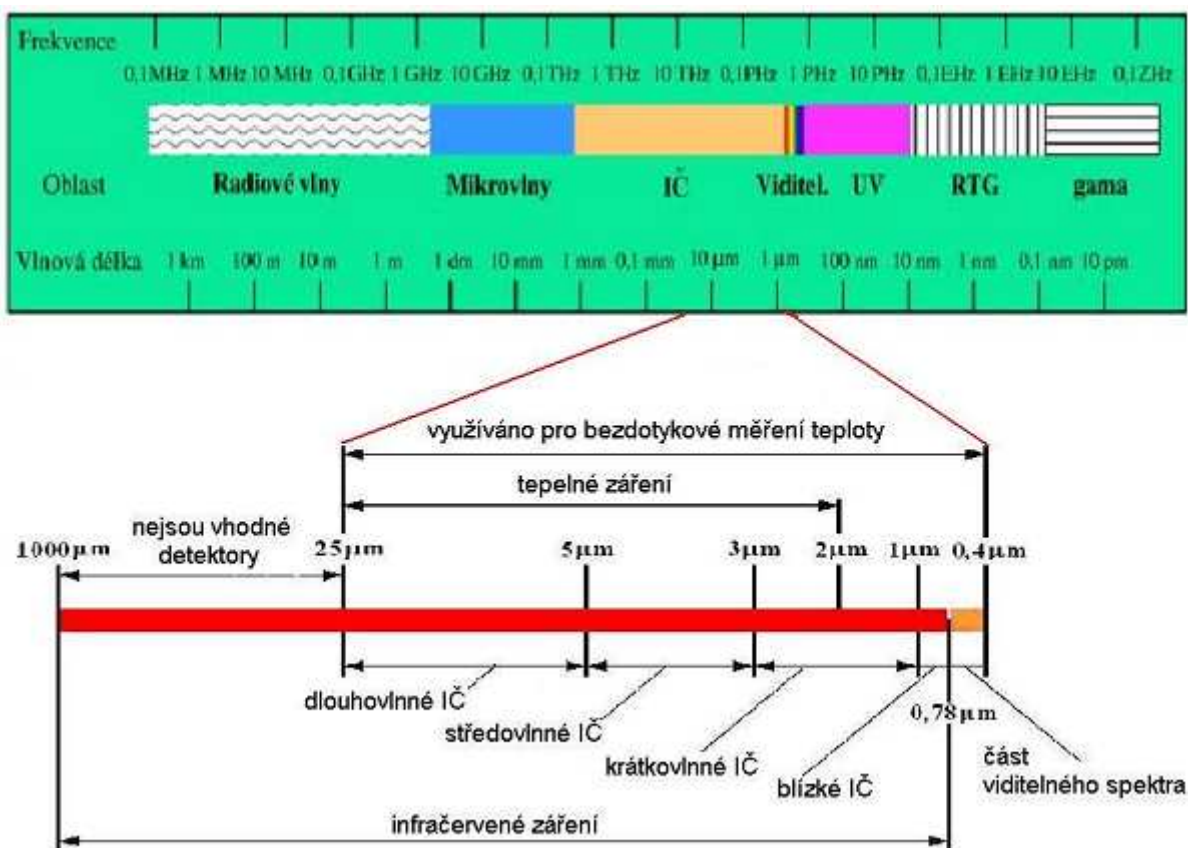
Obr.2-12 Směr pohybu interferenčních čar

Další složky rychlosti mohou být měřeny přidáním dalších párů paprsků, které se protínají ve stejném měřicím objemu. Aby bylo možné jednotlivé paprsky rozlišit, musí mít rozdílnou vlnovou délku. Běžně jsou používány modré, zelené a fialové paprsky argonového laseru. Měřicí objem má eliptický tvar a má délku od 0,1 do 1 mm v závislosti na úhlu mezi paprsky. Nejlepší výsledky měření jsou pro částice dostatečně malé, aby byly unášeny proudem, ale byly zároveň několikanásobně větší než vlnová délka. [7]

3 Bezdotykové měření teploty

3.1 Úvod do bezdotykového měření teploty

Tento způsob měření se v poslední době velice rozvíjí a to hlavně díky pokroku v elektronice a optice. Princip bezdotykového měření teploty spočívá v tom, že každé těleso o povrchové teplotě vyšší než 0K vysílá do okolí elektromagnetické záření, které odpovídá jeho teplotě. U bezdotykového měření teploty nás nejčastěji zajímá pouze část elektromagnetického spektra a to od $0,4 \mu\text{m}$ do $1 \mu\text{m}$. Tuto oblast lze rozdělit na oblast viditelného spektra $0,4 \mu\text{m} - 0,78 \mu\text{m}$ a oblast infračerveného spektra $0,78 \mu\text{m} - 1 \mu\text{m}$. [8]



Obr. 3-1 Elektromagnetické spektrum

3.2 Teorie za bezdotykovým měřením teploty

Nejdříve si musíme definovat absolutní černé těleso. Je to ideální těleso, které pohlcuje veškeré elektromagnetické záření, které na něj dopadá. Současně je absolutně černé těleso také ideální zářič, protože ze všech možných těles při dané teplotě vysílá také největší možné množství zářivé energie. Celkové množství vyzařené energie je pak pouze závislé na jeho teplotě. [4]



Obr. 3-2 Závislost vyzařované energie na vlnové délce

Intenzita vyzařování a pohlcování je úměrná podle Kirchhoffova zákona což znamená, je-li teplota tělesa větší než teplota okolí, převažuje vyzařování nad pohltivostí. Intenzita vyzařování dokonale černého tělesa H_0 závisí jen na jeho absolutní teplotě T a podle Stefan-Boltzmannova zákona platí: [8]

$$H_0 = \sigma \cdot T^4$$

Stefan-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$.
Indexem 0 je označeno dokonale černé těleso.

Intenzita vyzařování má integrální charakter a skládá se z příspěvků při jednotlivých vlnových délkách podle vztahu:

$$H_0 = \int_0^{\infty} H_{0\lambda} d\lambda$$

$H_{0\lambda}$ - spektrální hustota intenzity vyzařování (W m^{-3})

λ - vlnová délka (m)

Závislost spektrální hustoty intenzity vyzařování na vlnové délce a teplotě je dána Planckovým vyzařovacím zákonem:

$$H_{0\lambda} = \frac{2 \cdot \pi \cdot h \cdot c^2}{\lambda^5 \left(\exp \frac{h \cdot c}{k \cdot \lambda \cdot T} \right)} = \frac{c_1}{\lambda^5 \left(\exp \frac{c_2}{\lambda \cdot T} - 1 \right)}$$

h - Planckova konstanta

k - Boltzmannova konstanta

c - rychlost světla ve vakuu

Konstanty $c_1 = 3,7413 \cdot 10^{-16}$ (W m²)

$c_2 = 1,4388 \cdot 10^{-2}$ (K m)

Skutečná tělesa vyzařují i pohlcují méně než černé těleso. Jeho spektrální hustota intenzity vyzařování H_λ je dána vztahem:

$$H_\lambda = H_{0\lambda} \cdot \varepsilon_\lambda$$

ε_λ - emisivita pro danou vlnovou délku

Emisivita je definována jako poměr intenzity vyzařování reálného tělesa a vyzařováním absolutně černého tělesa se stejnou teplotou. Pohybuje se v rozmezí od 0 do 1. Přičemž absolutně černé těleso má emisivitu 1. [8]

3.3 Rozdělení pyrometrů

Pyrometr je bezdotykový teploměr určující teplotu měřeného tělesa z teplotního záření. Nejčastěji se používá pro měření teplot v rozsahu -50°C až $+3500^{\circ}\text{C}$. [8]

Pyrometry lze rozdělit dle mnoha kategorií:

- přístroje, které měří přímo, tzv. pyrometry
- přístroje, které nám zobrazují dané teploty, tzv. termovize

Dle způsobu detekce záření:

- subjektivní - detektorem záření je lidské oko (jasové a barvové pyrometry)
- objektivní – záření je detekováno selektivními (Si, Ge) nebo neselektivními (bolometrické, termoelektrické, pyroelektrické) detektory záření

Dle využití spektrální oblasti záření:

- monochromatické – pracují se zářením jedné nebo dvou vlnových délek
- pásmové – pracují se zářením v širším pásmu vlnových délek
- úhrnné – pracují se zářením v celém pásmu vlnových délek

Další způsob rozdělení pyrometrů lze provést na základě jednotlivých částí pyrometrů:

Optický systém:

- clonkový
- čočkový
- zrcadlový
- světlovodný

Zaměřovací systém:

- optický přes objektiv
- světelný (např. laserový paprsek)
- mířidlový (puškový)

3.4 Pyrometry

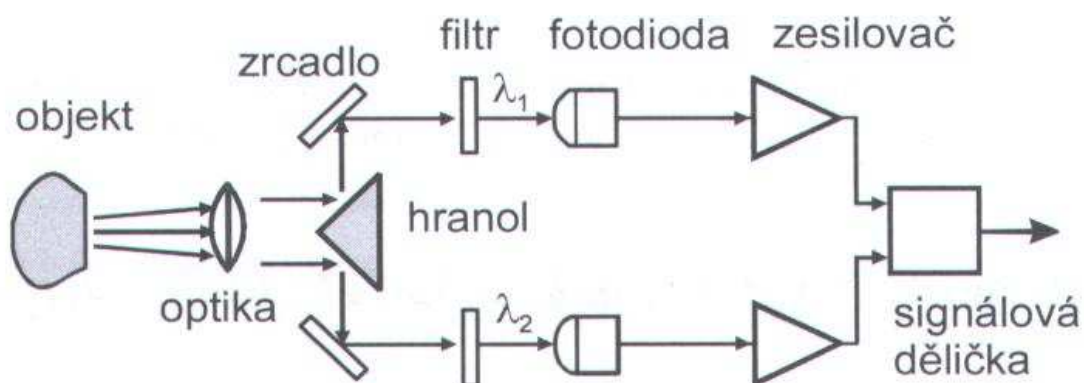
3.4.1 Dvoupásmové pyrometry

Dvoupásmové neboli poměrové pyrometry, jsou mnohem méně citlivé na stanovení absolutní hodnoty emisivity a její změny. Měření teploty je prováděno na základě poměrů dvou signálů o vlnových délkách λ_1 , λ_2 . Teplota pak závisí pouze na spektrálních emisivitě objektu při těchto vlnových délkách. Pyrometry jsou kalibrovány při teplotě černého tělesa, při níž je poměr zářích pro tyto vlnové délky stejný jako u měřeného tělesa při skutečné teplotě. [8]



Obr.3-3 Kalibrační černé těleso

Princip činnosti spočívá v tom, že skrz pomocnou optiku je signál dále rozdělen a soustředěn na polopropustné filtry, které zachovávají pouze záření o vlnových délkách λ_1 , λ_2 , přičemž je zbytek tímto filtry pohlcen. Tyto dva signály jsou následně detekovány a zpracovány elektronikou. Jejich poměr je pak měřená teplota. [8]



Obr. č. 3-4 Princip činnosti dvoupásmového pyrometru

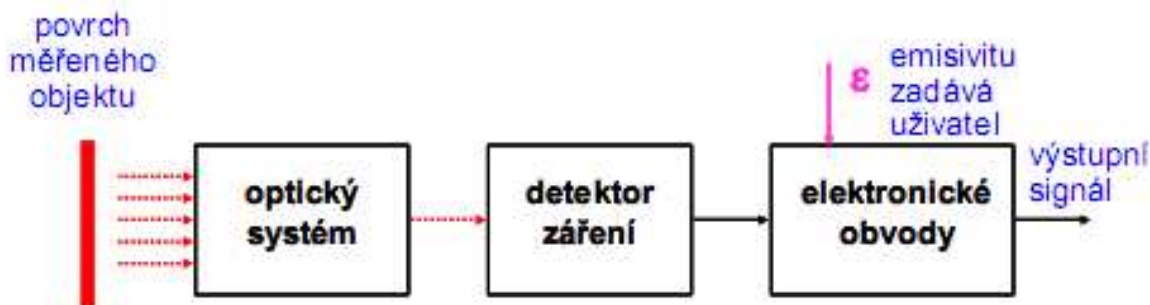


Obr. 3-5 Dvoupásmový pyrometr

3.4.2 Úhrnné pyrometry

Pyrometry někdy také označované jako radiační nebo pyrometry celkového záření. Jsou více citlivé než úzkopásmové, avšak jejich údaj silně závisí na správném určení emisivity. Přístroj měří intenzitu tepelného záření pomocí čidla a teplotu pomocí senzoru vestavěného v přístroji. Emisivitu ε musí nastavit uživatel. Jsou to přístroje vyhodnocující teplotu přímo dle Stefan-Boltzmanova zákona. Úhrnné pyrometry vyhodnocující dopadající záření teoreticky v celém spektru vlnových délek, tedy od $\lambda = 0$ do $\lambda = \infty$. Jako snímacími prvky lze použít pouze tepelná čidla (termočlánky, termistory, bolometry), které se účinkem dopadajícího záření chovají jako neselektivní snímače, tj. vykazují rovnoměrnou citlivost pro všechny vlnové délky. Díky vysoké citlivosti lze měřit i malá tělesa, tyto přístroje se také vyznačují nízkou časovou odezvou. Přesnost přístroje je však vysoká pouze pokud měřené těleso je svými vlastnosti blízké absolutně černému tělesu, tedy jestli jeho emisivita je blízká 1. [8], [9], [10]

Úhrnný pyrometr funguje tak, že tepelné záření vysílané měřeným objektem se soustřeďuje optickým systémem, který se stává z čoček a zrcadel, na čidlo pyrometru. Povrch čidla bývá začerněn. Pro měření se často používají keramické trubky, které jsou vloženy uzavřeným koncem do měřeného prostředí. Na dno této keramické trubky se poté zaměří pyrometr. Signál z čidla je poté zpracován elektronickým obvodem. Princip činnosti je popsán jednoduchým blokovým schématem níže. [8], [10]



Obr. 3-6 Blokové schéma úhrnného pyrometru

3.4.3 Pásmové pyrometry

Většina pyrometrů, které používají fotoelektrické detektory, s nimiž se můžeme v praxi setkat, je označována za pásmové pyrometry. Tyto pyrometry využívají pouze určitou část spektra tepelného záření měřeného objektu. Tato oblast je ale výrazně širší než u monochromatického pyrometru. [8], [10]

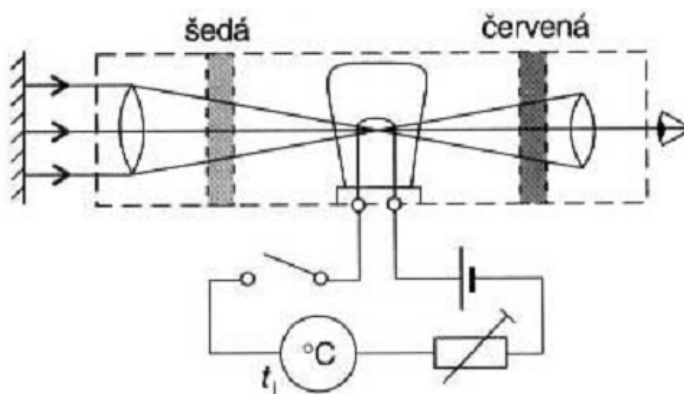
Tyto pyrometry mají rychlou reakci měření. Vhodnou volbou optiky a typem fotoelektrického článku určíme, jaké pásmo vlnových délek pyrometr používá. Tím lze vybrat takový pyrometr, který bude vhodný pro dané atmosférické podmínky a materiál měřeného objektu. Obecně lze říci, že selenové fotočlánky jsou vhodné v oblasti viditelného záření, křemíkové fotočlánky jsou vhodné pro rozsah $0,6\text{ }\mu\text{m}$ až $1,8\text{ }\mu\text{m}$ a fotoodpory vyrobeny z PbS jsou uplatňovány v rozmezí mezi $0,5\text{ }\mu\text{m}$ až $3,6\text{ }\mu\text{m}$. [8], [10]

3.4.4 Jasové pyrometry

Jedná se o monochromatické pyrometry využívající viditelnou část spektra okolo $0,65\text{ }\mu\text{m}$. Pyrometr je vybaven srovnávacím zdrojem záření, vnitřní optikou, červeným filtrem a obvodem pro modulaci jasu přijímaného nebo srovnávacího záření. Základní princip spočívá v porovnání jasu měřeného objektu přes filtr s jasnou pyrometrickou žárovkou. Je-li jas žárovky vyšší než jas měřeného objektu, pak vlákno žárovky září na temnějším pozadí. Je-li tomu naopak, pak je obrys vlákna temný na světlejším pozadí. Pozorovatel se snaží o to, aby jas pyrometrické žárovky byl stejný jako jas měřeného tělesa, tedy aby obraz vlákna zmizel. Regulace se provádí buď změnou příkonu žárovky za pomoci regulačního odporu, nebo u jiného typu jasového pyrometru za pomoci šedého klínu. Obecně lze říci, že jasové pyrometry nevyžadují tak pečlivé nastavení jako radiační. Nevýhodou je nutnost ruční manipulace. [8], [10]

Pyrometry s mizejícím vláknem

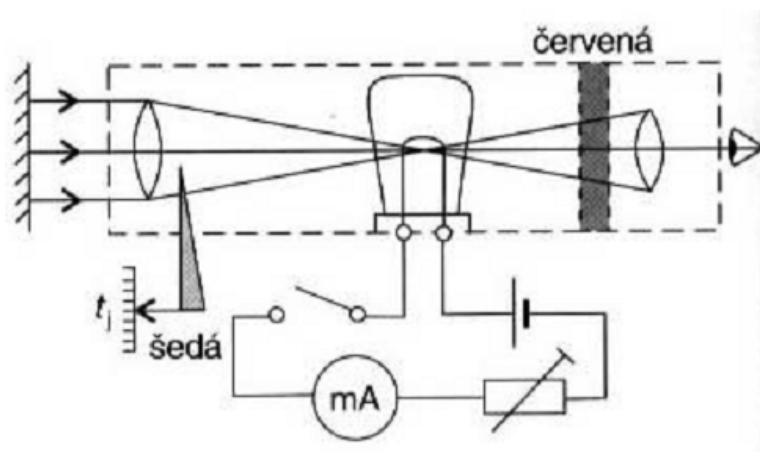
Využívají změny jasu pyrometrické žárovky. Naměřený proud žárovky je pak úměrný teplotě. Rozsah měření je omezen teplotou vlákna žárovky od 700 do $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Tento rozsah lze dále rozšířit při použití šedého filtru až na $3500\text{ }^{\circ}\text{C}$. [9], [10], [13]



Obr. 3-7 Pyrometr s mizejícím vláknem

Pyrometry s šedým klínem

U tohoto jasového pyrometru je jas pyrometrické žárovky konstantní a jas se vyrovnává posunem šedého klínu, který pak blokuje část dopadajícího záření. Míra teploty objektu je dána polohou šedého klínu. Díky konstantnímu jasů žárovky se zvyšuje její životnost. Měřicí rozsah se pohybuje od 700 do 3500 °C. [9], [13]



Obr. 3-8 Pyrometr s šedým klínem

Jasové pyrometry při odečítání na stupnici ukazují teplotu, která odpovídá záření absolutně černého tělesa. Údaj jasového pyrometru je tedy vždy nižší než skutečná teplota měřeného objektu. [9]

Pro zjištění skutečné teploty platí vztah:

$$\frac{1}{T_s} = \frac{1}{T_p} + \frac{\lambda}{c_2} \cdot \ln \varepsilon_\lambda$$

T_s [K] - skutečná teplota

T_p [K] - teplota na stupnici jasového pyrometru

λ [m] - použitá vlnová délka

$c_2 = 1,44 \cdot 10^{-2}$ [m K] - druhá vyzařovací konstanta

ε_λ [-] - spektrální emisivita měřeného objektu

3.5 Termovize

Termovizní systémy jsou založeny na zviditelnění tepelného záření, které objekty samy vyzařují. Slouží k vizualizaci povrchových teplot. Umožňuje nám získat i videozáznamy a napomáhá nám získat hlubší poznání o tepelných procesech různých zařízení a objektů. Umožňuje nám také sledování dynamického vývoje teplotního pole na celém objektu. Termovize lze rozdělit dle různých kritérií. Hlavním kritériem je zobrazování. [8], [12]

Podle způsobu zobrazování:

- systémy s rozkladem obrazu neboli scannery
- systémy bez rozkladu obrazu, s maticovými detektory

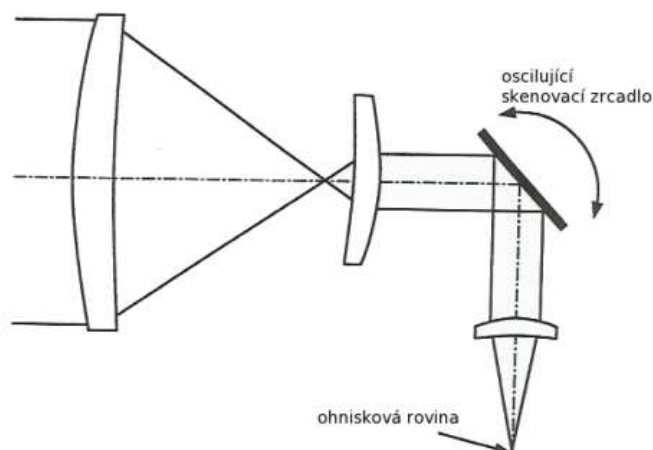
Dalšími kritérii jsou způsoby chlazení (s chlazeným detektorem, s nechlazeným detektorem), dle vlnové délky (krátko vlnové a dlouho vlnové) nebo například dle rychlosti záznamu. Termovize mají velmi široký význam použití, často se s nimi setkáme při měření v energetice, v oblasti přenosu tepla, v technice prostředí, v medicíně, při dálkovém výzkumu Země a v mnoha dalších oborech. [8], [12]



Obr. 3-9 Příklad termogramu

3.5.1 Systémy s rozkladem obrazu

Snímací systémy s postupným rozkladem obrazu pracují s opticko-mechanickým nebo elektrickým rozkladem obrazu a kvantovým detektorem. U tohoto typu snímání dochází k postupnému skenování celého pole. Tento proces bývá realizován například pomocí kmitajícího zrcátka, jak je naznačeno na obrázku níže. Mezi jejich výhody patří hlavně možnost pozorování termogramu i při denním světle, volba kontrastu termogramu ve velkých mezích, stejně jako teplotní rozsah, barevná reprodukce obrazu a možnost záznamu termogramu.[8], [12], [14]



Obr. 3-10 Princip postupného rozkladu obrazu

3.5.2 Systémy bez rozkladu obrazu

Přímo zobrazující systémy používají maticový detektor. Na povrchu detektoru se vytváří nábojový obraz úměrný dopadajícímu záření. Detektor je tvořen maticí infračervených senzorů. Matice kvalitních detektorů obsahují 160×120 elementů a detektory nejvyšší kvality pracují s rozlišením 320×240 až 640×480 obrazových bodů. Jako senzory se nejčastěji používají:

Tepelné senzory (mikrobolometry), u nichž IČ-záření vyvolá změnu teploty, která se poté vyhodnocuje jako změna odporu. Tento typ senzorů nevyžaduje chlazení.

Kvantové fotonové senzory (fotodiody a fotoodpory), u nichž dochází při dopadu IČ-záření ke změně elektrické vodivosti. Takové detektory zpravidla vyžadují chlazení. K tomu se například využívá Peltierův nebo Stirlingův chladič. [8], [12], [14]

4 Měření ultrazvukem

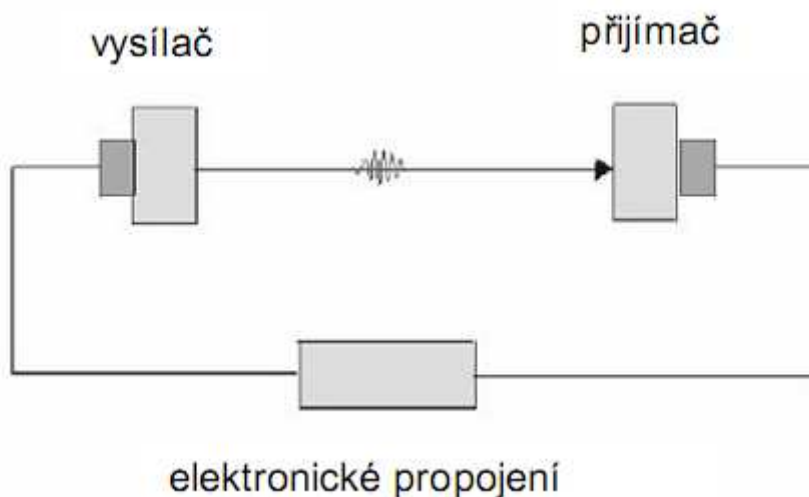
4.1 Úvod do měření ultrazvukem

Ultrazvuk je nejčastěji uplatňován při měření průtoku. Tento způsob měření je však nepřímý. Nejprve se změří průřezová rychlost průtočného média, která se pak násobí s průtočnou plochou. V praxi se uplatňují tři principiálně odlišné metody: [15]

- Metoda „sing-around“
- Metoda ultrazvukového dopplerovského měření (dopplerovská)
- Metoda ultrazvukového diferenčního měření (diferenční)

4.1.1 Metoda sing – around

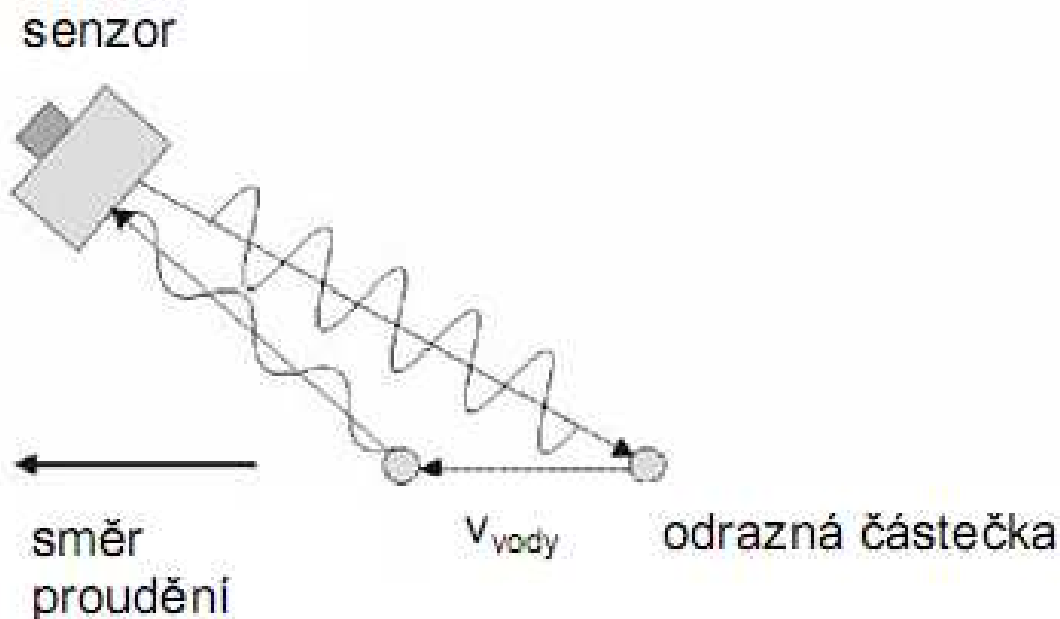
Tato metoda funguje tak, že vysílač generuje krátký ultrazvukový signál, který proběhne danou dráhou. Jakmile přijímač zaznamená vyslaný signál, elektronika dá znamení vysílači, který opět odešle ultrazvukový signál. Tento proces se neustále opakuje, čímž nám vznikne oběhová frekvence, která je úměrná rychlosti šíření ultrazvuku. Z této hodnoty lze pak vypočítat rychlost proudění na měrné dráze. Nejčastěji se toho využívá při bodovém měření rychlosti. [15]



Obr. 4-1 Schéma akustického sing – around okruhu

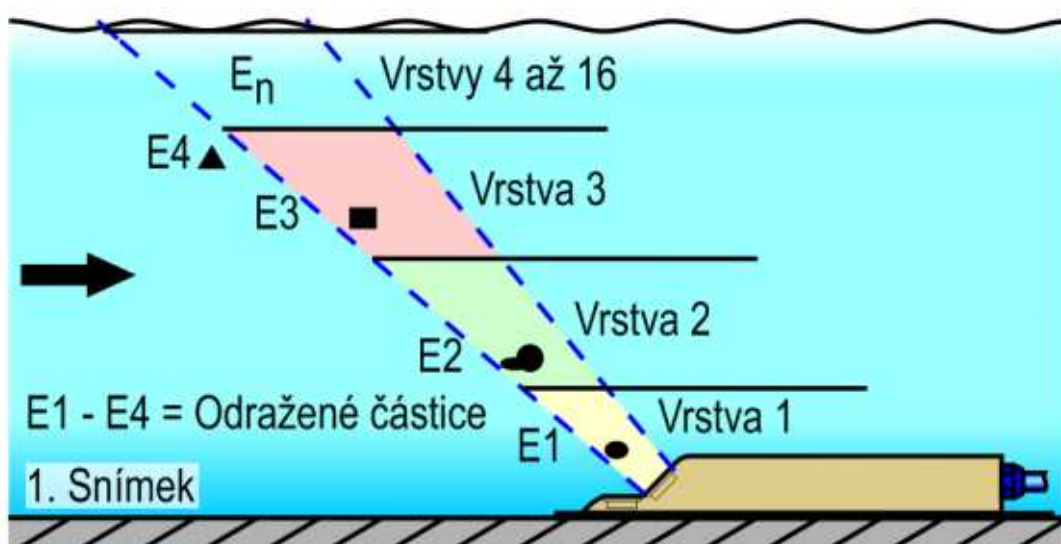
4.1.2 Metoda ultrazvukového dopplerovského měření

Tato metoda uplatňuje dopplerovský princip, kdy je využíváno odrazu ultrazvukových vln od částic obsažených v daném médiu. Přitom se předpokládá, že jsou tyto částice unášeny stejnou rychlostí, jako je rychlost proudícího média. Odražené ultrazvukové vlnění je přijímáno senzorem, který zaznamená odchylku ve frekvenci. Ta je způsobena dopplerovským frekvenčním posunem, který je úměrný rychlosti pohybu unášené částice. Součástí měření i čas, za který se signál navrátí k vysílači, čímž se zjistí vzdálenost této částice. To nám určí rychlostní profil podél měřené linie. Nejčastěji se tato metoda uplatňuje při měření průtoku řekách, kanálech a stokách. [15]

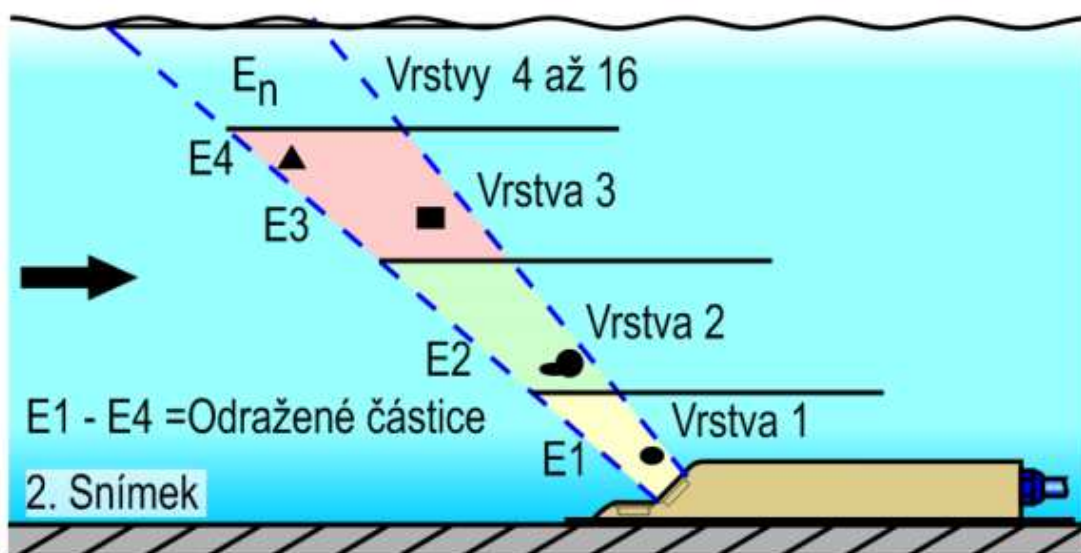


Obr. 4-2 Princip dopplerovského měření

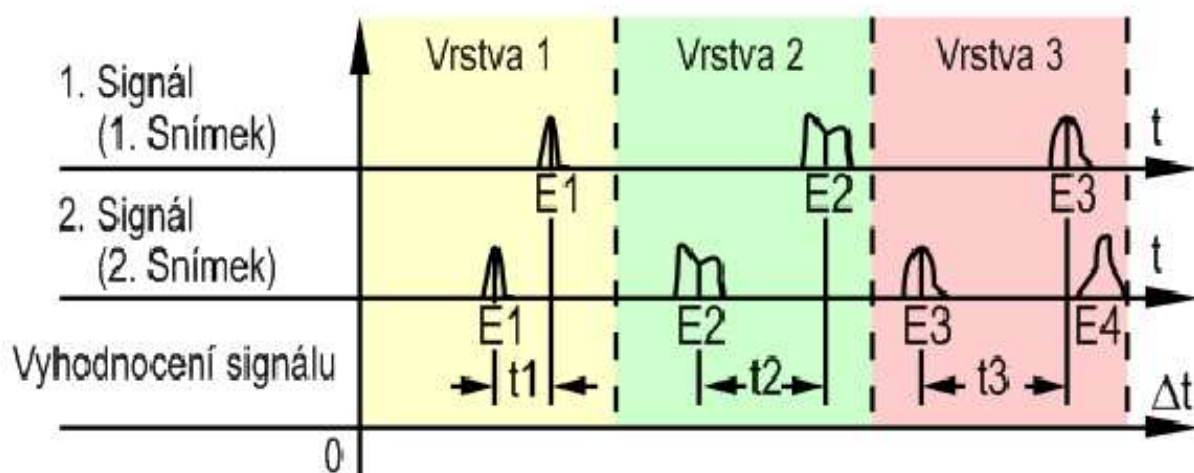
V praxi se výše uvedeného principu využívá tak, že je měrný profil po výšce rozdělen až na 16 vrstev, ve kterých se provede výpočet rychlosti. Probíhá to tak, že se vždy čeká, než je zaznamenán odražený signál a tyto data se uloží. Tento proces se opakuje každých 0,5 až 4 μs . Za pomoci korelační metody jsou data z jednotlivých snímků porovnány a tyto data nám po přepočtu udají rychlost proudění v daném řezu. Tento proces se opakuje až 2000 x za sekundu a za pomoci výpočetní techniky je získáván rychlostní profil v reálném čase. [16]



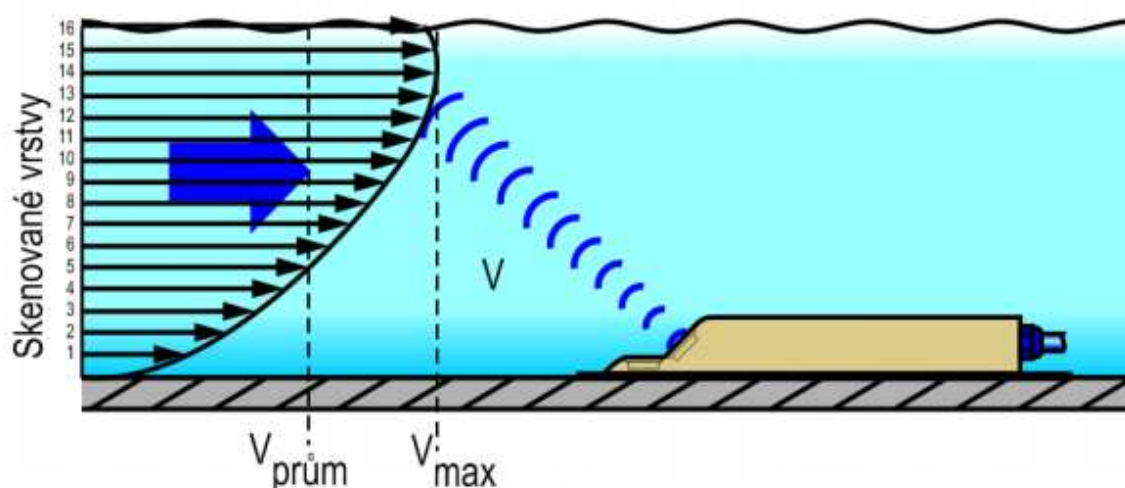
Obr. 4-3 Data z prvního snímku



Obr. 4-4 Data z druhého snímku



Obr. 4-5 Vyhodnocení signálu



Obr. 4-6 Vznik rychlostního profilu

4.1.3 Metoda ultrazvukového diferenčního měření

Princip metody spočívá v měření času, který uběhne mezi vysláním a přijmutím signálu. Vychází se z toho, že zvukové vlně trvá delší dobu překonání dané vzdálenosti, jestliže se šíří proti proudu než po proudu. Časový rozdíl vlny šířící se po proudu a proti proudu je přímo úměrný rychlosti proudění. Daný průtok korytem je závislý na průtočném průřezu, proto musí být monitorována také výška hladiny. Pro správné hodnoty průtoku je nutno provést kalibraci s ohledem na geometrické vlastnosti koryta. Nejčastěji se při měření využívá ultrazvukových impulsů. [15]

Měření doby průchodu signálu mezi oběma senzory se jednoduše stanoví dle rovnice.

Doba průchodu signálu ve směru proudu:

$$t_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{c + v_{1-2}}$$

Doba průchodu signálu ve směru proti proudu:

$$t_{2-1} = \frac{L_{1-2}}{c - v_{1-2}}$$

Časová difference je pak za předpokladu, že $c \gg v$

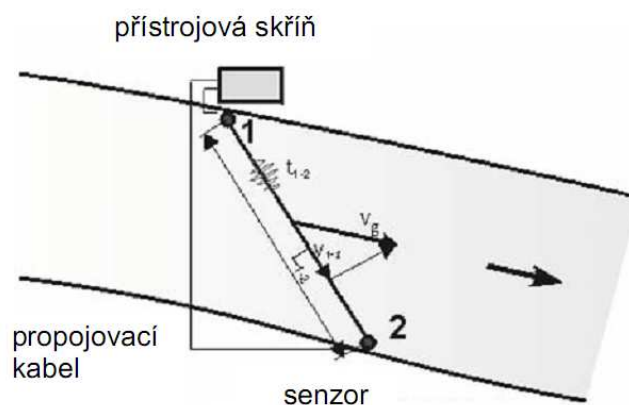
$$\Delta t = \frac{2L_{1-2} \cdot v_{1-2}}{c^2}$$

kde jsou:

L_{1-2} - délka přímá spojnice mezi senzory

c - rychlost šíření ultrazvuku ve vodě,

v_{1-2} - střední hodnota rychlosti proudění v měrné dráze.



Obr. 4-7 Schéma principu měření

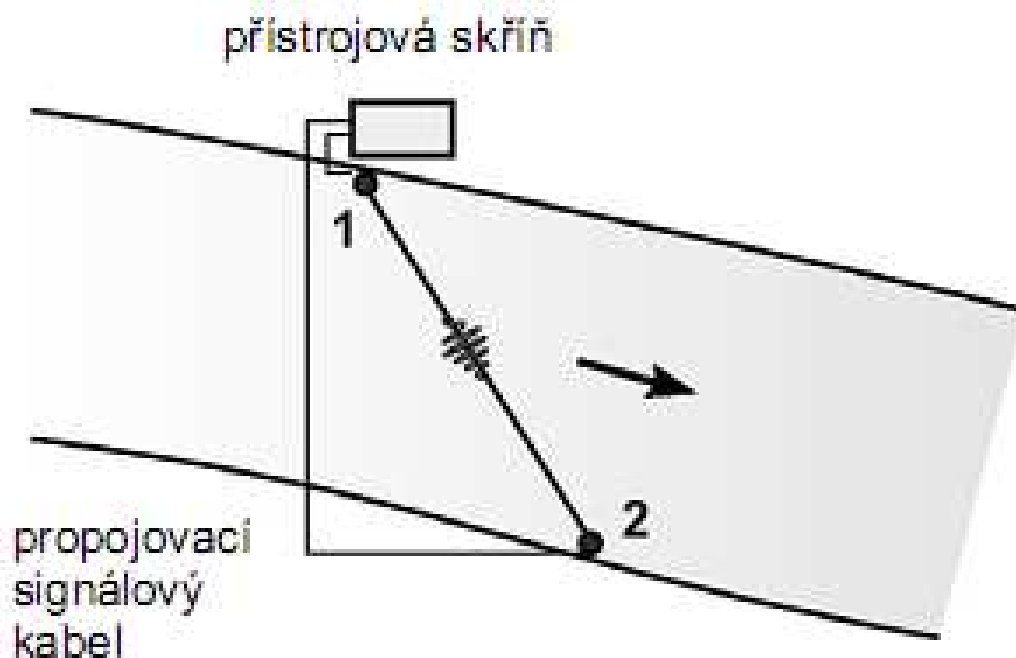
4.2 Uspořádání senzorů při měření průtoku v korytech

S ohledem na podmínky měření geometrii toku a možnosti umístění měřících zařízení lze senzory uspořádat dle způsobu zapojení do několika skupin. [15]

- Jednocestný systém
- Křížový systém
- Systém s responderem
- Systém s reflektorem
- Víceúrovňový systém

4.2.1 Jednocestný systém

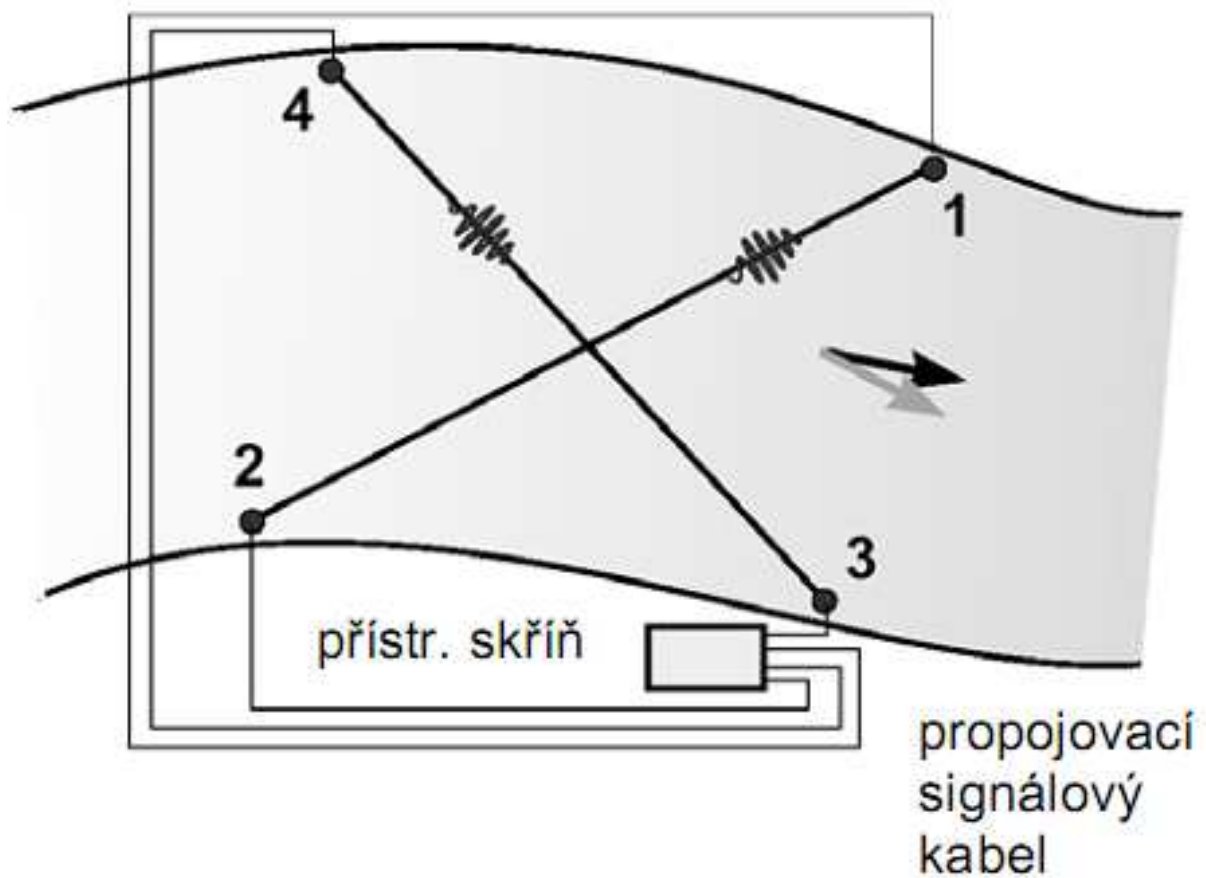
Tento nejjednodušší systém je vhodný pouze pro upravená koryta a kanály. Tvoří ho dva šikmo proti sobě upevněné senzory. Tyto senzory pracují střídavě jako vysílač a přijímač. Schéma uspořádání senzorů je na obrázku níže. [15]



Obr. 4-8 Schéma jednocestného systému

4.2.2 Křížový systém

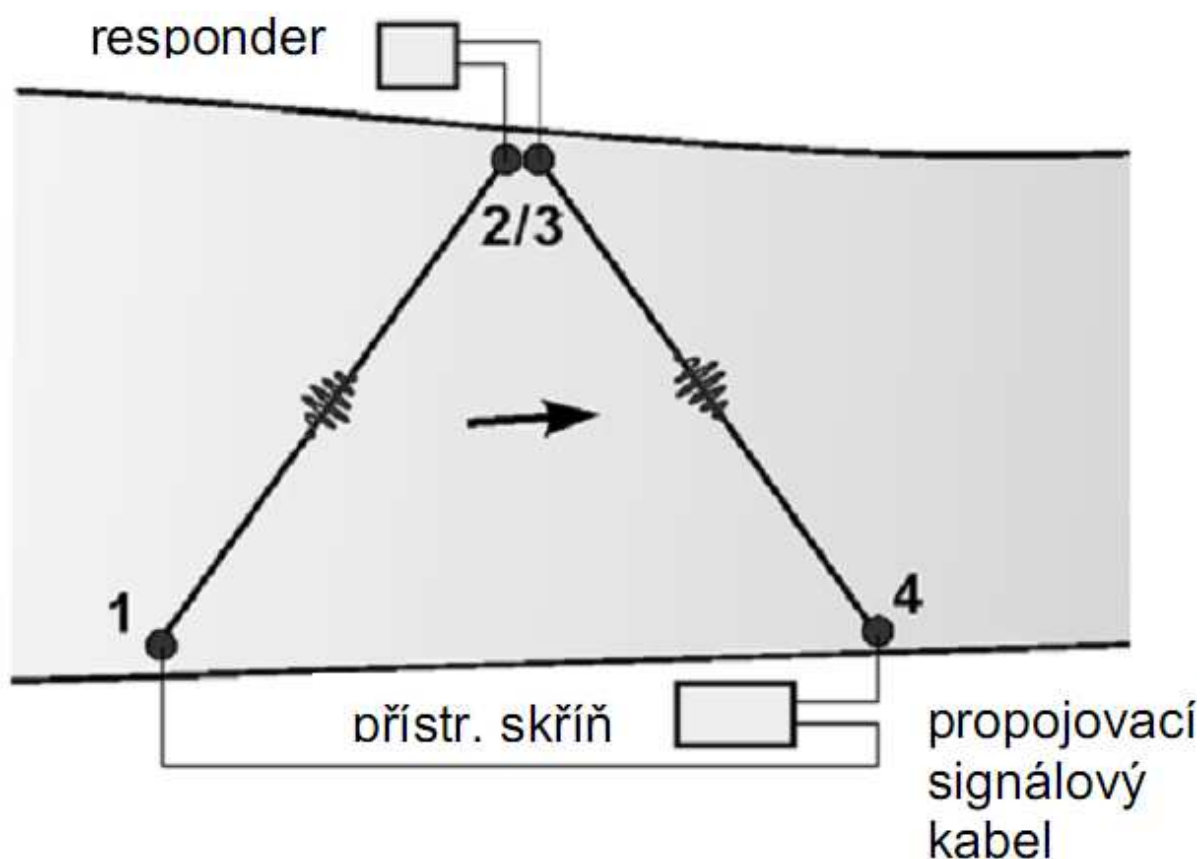
Křížový systém je vhodný pro přirozená vodní koryta, kde není běžné aby hlavní proudění bylo rovnoběžné s břehy. To se kompenzuje za pomoci dvou měrných drah situovaných do tvaru kříže. Druhá dráha slouží jako dodatečná informace potřebná k dopočítání hlavního směru proudění. U křížového systému samotné měření probíhá tak, že se nejdříve měří současně doby průchodu signálu v měrných drahách 1-2 a 3-4, potom v opačném směru v měrných drahách 2-1 a 4-3. Křížový systém je popsán na schématu níže. [15]



Obr. 4-9 Schéma křížového systému

4.2.3 Systém s responderem

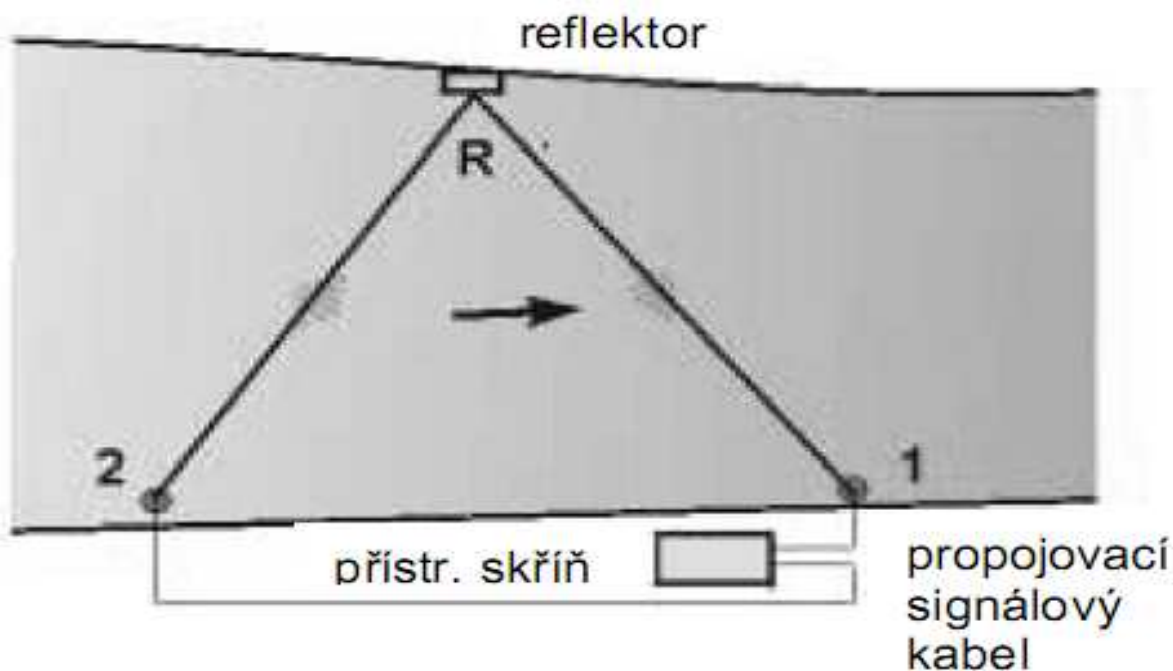
V některých případech může nastat situace, že není možné, aby byli propojeny senzory na protějších březích spojovacími kabely. Řešení pak spočívá v instalaci obou senzorů na jeden břeh. Na druhý břeh je pak umístěno zařízení zvané responder. Ten slouží jako přijímač, zesilovač a vysílač. Nejprve dojde odeslání signálu proti proudu, signál je poté responderem zesílen a co nejdříve zaslán k druhému přijímači. Měření doby průchodu ve směru proudu probíhá obdobně, ale v opačném pořadí. I přes to, že systém využívá čtyř senzorů, jsou informace získané při měření obdobné jako u jednocestného systému. Schéma rozmístění senzorů v systému s responderem je na obrázku níže. [15]



Obr. 4-10 Schéma systém s responderem

4.2.4 Systém s reflektorem

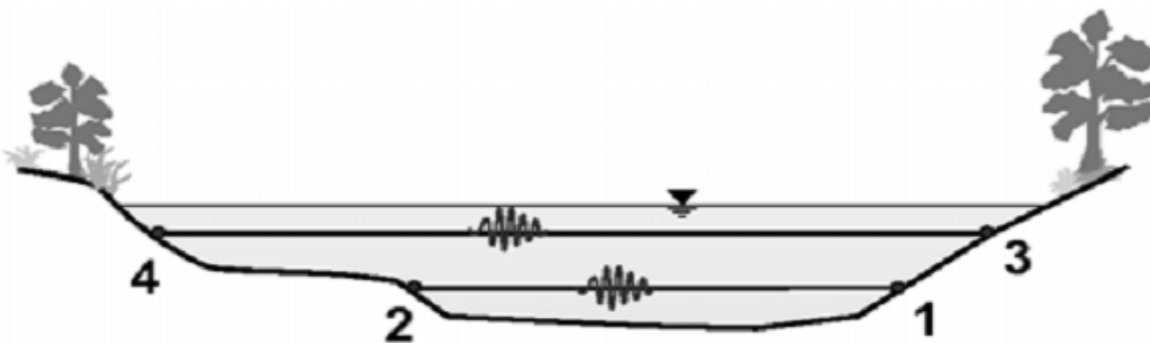
Tento systém zapojení senzorů pracuje obdobně jako systém s responderem. Avšak nyní není signál zesílen, ale pouze odražen. Tím dochází k tomu, že původní signál musí urazit dvojnásobnou dráhu. Aby signál nebyl příliš slabý, je tento systém aplikován pouze na malé toky. Schéma uspořádání tohoto systému je na obrázku níže. [15]



Obr. 4-11 Schéma systému s reflektorem

4.2.5 Víceúrovňový systém

U měření toků kde dochází k velkému kolísání hladin nebo tam kde stavba koryta je geometricky velmi složitá, se pro správně změřený průtok musí aplikovat víceúrovňové uspořádání. V každé úrovni může pak být použita jednocestná nebo křížová konfigurace. Pokud použijeme dostatečný počet vrstev, bude nám znám i rychlostní profil. Nejlepší dosažené výsledky se dosahují při použití křížových systému, kde se minimalizují chyby způsobené směrem proudění. [15]



Obr. 4-12 Schéma víceúrovňového systému

4.2.6 Výpočet výsledné rychlosti

Výpočet rychlosti ukážu na jednocestném systému. Z rovnic pro výpočet měrných veličin t_{1-2} a t_{2-1} se po vyjádření rychlosti ultrazvuku c a jejich sloučení dá vyjádřit složka rychlost proudění v_{1-2} . [15]

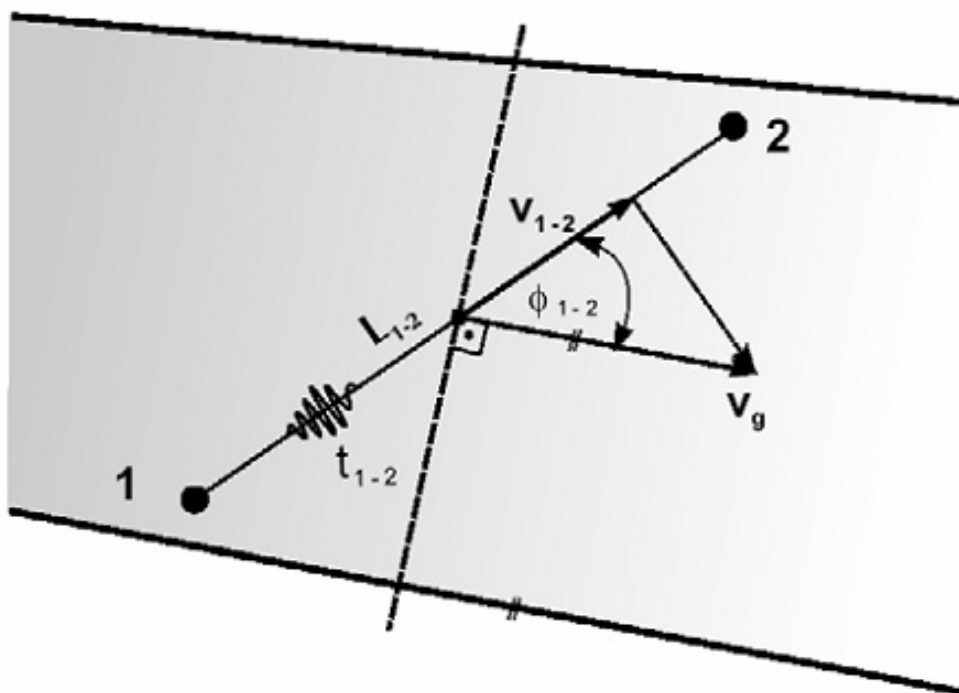
$$v_{1-2} = \frac{L_{1-2}}{2} \left(\frac{1}{t_{1-2}} - \frac{1}{t_{2-1}} \right) = \frac{L_{1-2}}{2} \left(\frac{\Delta t}{t_{1-2} \cdot t_{2-1}} \right)$$

Úhel ϕ_{1-2} je u jednocestného systému znám, pro rychlost proudění pak platí:

$$v_g = \frac{v_{1-2}}{\cos \phi_{1-2}}$$

Po sloučení těchto předešlých rovnic dostaneme konečnou rovnici rychlosti:

$$v_g = \frac{L_{1-2}}{2 \cos \phi_{1-2}} \left(\frac{1}{t_{1-2}} - \frac{1}{t_{2-1}} \right)$$



Obr. 4-13 Schéma k výpočtu rychlosti pro jednocestný systém

4.2.7 Výpočet průtoku

Pro tento případ ukážu výpočet průtoku opět na jednocestném systému. Při výpočtu průtoku se využívá rovnice kontinuity. Je také třeba zavést rychlostní koeficient k_1 , který zohledňuje rozdíl mezi střední rychlostí v_g v úrovni měrné dráhy a střední průřezovou rychlostí v_m v měrném profilu. Koeficient k_1 lze stanovit empiricky, logaritmickým rozdělením rychlosti nebo numerickým modelováním proudění. [15]

Rovnice kontinuity:

$$Q = v_m A$$

kde:

v_m - střední průřezová rychlost

A – průtočná plocha

Rychlostní koeficient k_1 :

$$k_1 = \frac{v_m}{v_g}$$

Konečný průtok se pak stanoví z následující rovnice:

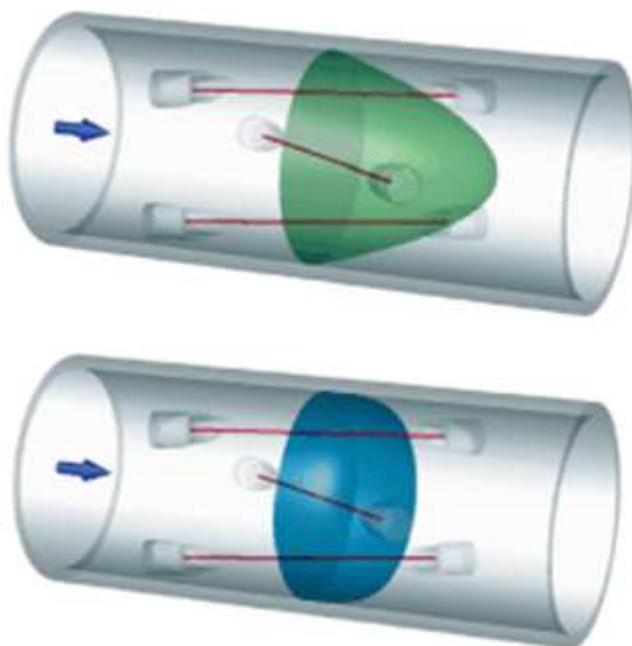
$$Q = k_1 \cdot A \cdot v_g = k_1 \cdot A \cdot \frac{L_{1-2}}{2 \cos \phi_{1-2}} \left(\frac{1}{t_{1-2}} - \frac{1}{t_{2-1}} \right)$$

4.3 Měření průtoku v potrubí

Stejně tak jako u měření průtoku v korytech využívá se diferenční ultrazvuková metoda pro měření průtoku v potrubích. Pro spíše orientační měření postačí jednokanálové průtokoměry, u kterých vlnění prochází středem potrubí. Tyto nejjednodušší průtokoměry ale mohou dosahovat značných odchylek od skutečných středních rychlostí v závislosti na typu proudění (laminární, turbulentní). [17]

Pro zlepšení přesnosti měření lze využít vícekanálových průtokoměrů, které mají posunuty měřicí dráhy směrem ke stěnám potrubí. Při tomto typu zapojení senzorů už systém není tak citlivý na charakteru proudění. Obecně lze říci, že s narůstajícím počtem senzorů narůstá také přesnost měření. Zatímco u jednokanálové průtokoměry mohou dosahovat chyby až 30%, dvou, tří a pětikanálové dosahují přesnosti 0,5, 0,3 a 0,1%. Přesto že více senzorové systémy nám dávají mnohem více informací o tvarech rychlostních profilů, jsou také více finančně nákladné. [17]

Jako kompromis lze považovat tříkanálový ultrazvukový průtokoměr, který nám poskytuje dostatečné množství informací pro přesné měření. Na obrázku níže je zobrazeno uspořádání senzorů pro tříkanálový průtokoměr. [17]



Obr. 4-14 Uspořádání nezávislé na rychlostním profilu

4.4 Ultrazvukové měření výšky hladiny

Ultrazvukové měření výšky hladiny patří mezi nejstarší a nejjednodušší bezdotykové aplikace. Tento typ snímačů je vhodný pro měření stavu kapalin, prstovitých hmot i sypkých materiálů. Celý proces funguje velice jednoduše. Vysílač vysílá periodicky ultrazvukové impulzy směrem k povrchu měřené látky. Paprsek ultrazvuku je tvaru úzkého kužele. Paprsek je odrážen od hladiny, která působí jako reflektor. Tyto signály jsou detekovány vysílačem, který v tomto případě slouží také jak přijímač. Vyhodnocuje se doba, která uplynula mezi, odesláním impulsu a přijetím jeho odrazu. Vzdálenost jde za předpokladu konstantní rychlosti šíření zvuku v daném prostředí vypočítat z jednoduchého vztahu níže. [17], [18]

$$s = \frac{v \cdot t}{2}$$

kde:

s – vzdálenost detektoru od hladiny

v – rychlost šíření zvuku v daném prostředí

t – čas odezvy signálu

Při měření výšky hladiny ultrazvukem je třeba dbát na tzv. mrtvou zónu, což je oblast, ve které by přístroj nebyl schopen zaznamenat odražený impuls. Tato zóna vzniká z toho důvodu, že sonda, která je tvořena piezorezistivním rezonátorem, potřebuje nějaký čas pro přechod mezi přijímacím a vysílacím módem. Proto minimální vzdálenost pro měření jednou ultrazvukovou sondou se pohybuje od 0,2 do 0,8 m. [17], [18]

U měření ultrazvukem narazíme na několik omezení. Snímač je důležité chránit před vysokými teplotami. Docházelo by nejen k velké chybě měření, ale samotná konstrukce piezorezistivního rezonátoru je použití ultrazvukových snímačů zpravidla omezeno na teploty do 100 °C, výjimečně do 150 °C. Další důraz je třeba klást na to, že z důvodu potřeby látkového prostředí pro šíření zvukových vln, není možné, aby tento typ detektoru fungoval ve vakuu. Co se týče přetlaku je konstrukce rezonátoru stavěna pouze na několik stovek kilopascalů přetlaku. Také vysoké koncentrace některých plynů a pár nebo velmi prašné prostředí má negativní vliv na průběh měření, protože dochází útluhu signálu. Dále je třeba dbát na to, zda nevzniká na měřené hladině pěna, která může způsobit zkreslení měřených veličin. [17], [18]

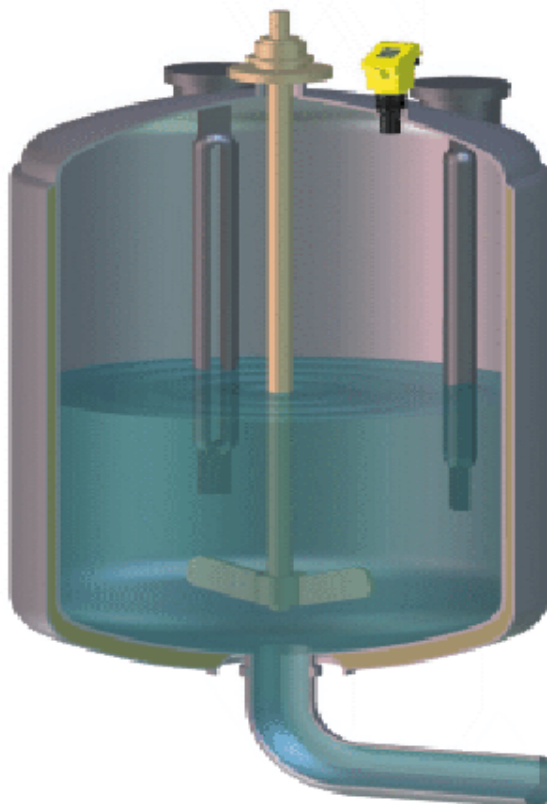
I přes tyto mnohé nevýhody má měření výšky hladiny ultrazvukem mnoho aplikací. Některé aplikace jsou ukázány na obrázcích níže.



Obr. 4-15 Ultrazvuková sonda fmu 40



Obr. 4-16 Ultrazvukové měření hladiny v otevřeném prostředí



Obr. 4-17 Měření výšky hladiny v uzavřené nádobě

4.5 Ultrazvukové měření hladiny přes stěnu nádoby

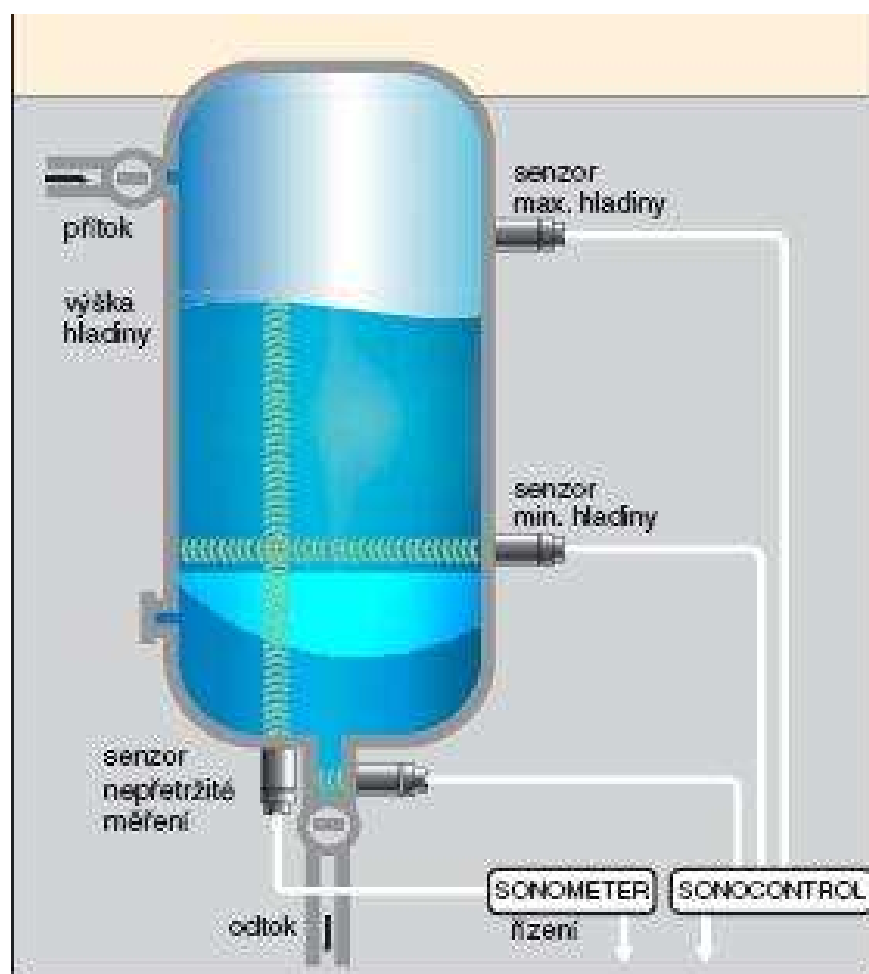
Ve snaze o negování některých nevýhod při měření ultrazvukem, které byly jmenovány výše, byla vyvinuta technologie, která umožňuje měření výšky hladiny přes stěnu nádoby. To je možné za předpokladu, že nádoba je vyrobena ze zvukově vodivého materiálu (ocel, sklo, plast). Díky tomu, že ultrazvukový snímač je upevněn na vnější stěně nádoby odpadají problémy s tlakem, agresivitou vnitřního prostředí či jinými vlastnostmi, které znemožňují nebo zkreslují měření. [19]



Obr. 4-18 Umístění snímače na vnější stěně nádoby

Mezi další výhody této varianty je také snadné zavedení do již existujícího technologického procesu. Pokud se v průběhu měření dochází ke změně teploty nebo hustoty měřené kapaliny, je nutné provést jejich kompenzaci. Kompenzace vlivu změny teploty je snadno proveditelné zabudováním teplotní sondy, ze které jsou informace předávány vyhodnocovací jednotce. Při změně hustoty v průběhu měření je nutné použít tzv. referenční měření za pomoci druhé ultrazvukové sondy. Ta je instalována ze strany nádrže, aby docházelo k odrazu od protější stěny nádrže. Jelikož velikost nádrže je nám známa a rychlost šíření zvuku je závislá na hustotě materiálu, kterým se šíří, můžeme ze změny doby šíření těchto signálů hustotu dopočítat. [19]

Instalace snímače závisí na jeho určení. Pokud má snímač analogově měřit výšku hladiny, pak se instaluje z vnější strany na dno nádrže. V případě, že má detekovat překročení určité meze nebo zaplnění potrubí kapalinou, instaluje se v daném místě ze strany nádrže nebo potrubí. [19]



Obr. 4-19 Umístění snímačů dle účelu použití

5 Měření radarem

Název vychází z anglického akronymu pro Radio **D**etecting **A**nd **R**anging. Je to přístroj, který se hlavně používá pro určení vzdálenosti objektů. Pracuje na stejném principu jako ultrazvukový dálkoměr, ale na místo zvuku operuje s elektromagnetickým vlněním. Vlnění se šíří rychlostí 300 000 km/s. Měří se doba, za kterou je detekován odražený paprsek. Vzdálenost lze vypočítat podle jednoduchého vztahu. [4], [20]

$$d = \frac{c \cdot T}{2}$$

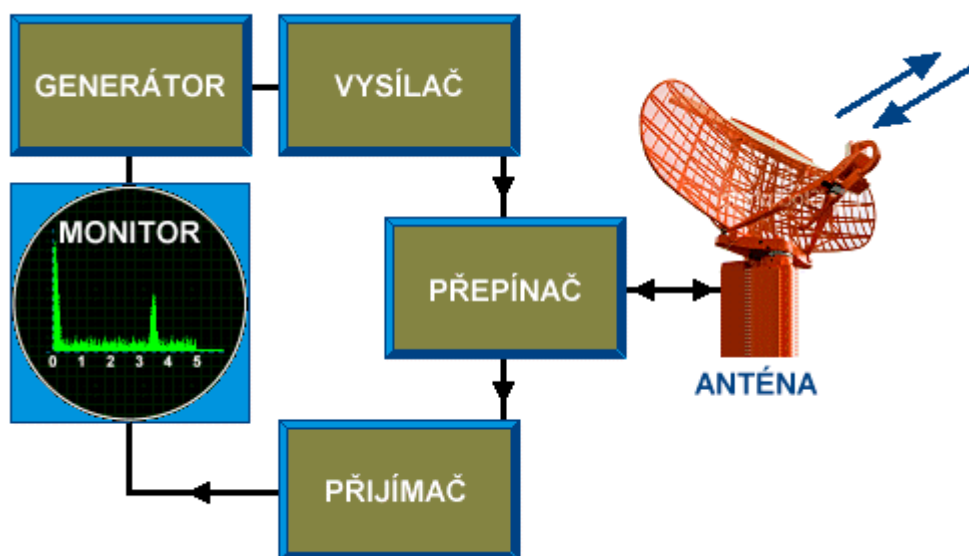
kde:

d- vzdálenost objektu od radaru

c- rychlost světla

T- doba mezi vysláním a návratem signálu

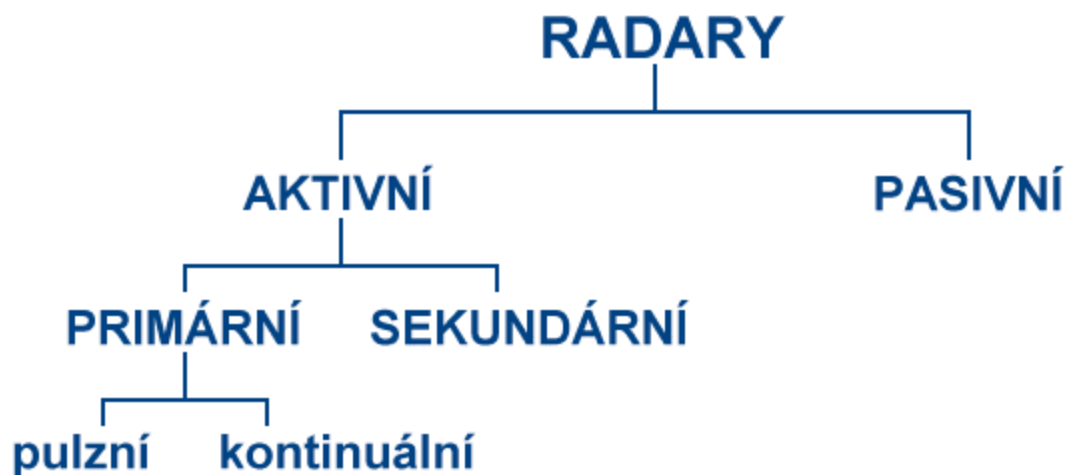
Celý systém se skládá obecně z generátoru, který generuje krátké elektrické impulzy. Ty jsou elektronicky zpracovány a vyslány k měřenému objektu. Od něj se vlny odrazí a jsou zaznamenány anténou. Tyto impulzy jsou upraveny, zesíleny a zaslány do vhodného zobrazovacího zařízení. Proces je ukázán na obrázku níže. [4], [20]



Obr. 5-1 Popis činnosti radaru

5.1 Rozdělení radarů

Radary lze dle použití parametrů a konstrukce rozdělit do několika skupin.



Obr.5-2 Rozdělení radarů

Primární radar je samostatně pracující, nepotřebuje k činnosti žádná jiná zařízení. Vysílá vysokofrekvenční impulzy a pak detekuje jejich odrazy, ze kterých získává informace o poloze a rychlosti cíle. [21]

Sekundární radar se využívá hlavně pro řízení leteckého provozu. Na zemi je umístěn radarový vysílač (tzv. dotazovač) a přijímač, na palubě letadla je zabudován speciální vysílač (tzv. odpovídač). Dotazovač vyšle směrem k letadlu impulz, na které odpovídač reaguje vysláním zakódovaného signálu směrem k přijímači, který tyto informace dekoduje a získá potřebné informace. [21]

Pulzní radar má jedinou parabolickou anténu, kterou střídavě vysílá a přijímá signály. Přičemž se před vysláním dalšího signálu čeká na příjem předešlého odraženého. Z toho vyplývá, že čím vzdálenější objekty pozorujeme, tím větší pauza musí být. [21]

Kontinuální radar vysílá nepřerušovaný signál a nepřerušovaně jej také přijímá. Aby to bylo možné, musí mít radar dvě antény. Jednu pro vysílání a druhou pro příjem. [21]

Rozdíl mezi aktivním a pasivním radarem je ten, že pasivní radary neobsahují vysílače, ale pouze přijímače. Těmito sledují různé signály z jiných radarů a jiných zdrojů elektronických signálů. Aby bylo možno přesně určit vzdálenost a výšku sledovaného objektu, je zapotřebí rozmístit alespoň 3 různé přijímače vzdálené od sebe desítky kilometrů. [21]

Radary se využívají v mnoha oblastech a aplikacích. Podle toho pro jaký účel se radar používá, jsou dána vhodná pásma. [21]

Pásmo	Frekvence GHz	Vlnová délka cm	Využití
L	1 - 2	15 - 30	Řízení leteckého provozu
S	2 - 4	7,5 - 15	Řízení leteckého a námořního provozu, mikrovlnná trouba
C	4 - 8	3,75 – 7,5	Satelitní vysílání
X	8 - 12	2,5 – 3,75	Sledování a řízení raket, námořní radary, meteorologie, letecký provoz, radarové mapování
K	12 - 40	0,75 – 2,5	Radarové mapování, satelitní navigace, meteorologie, měření rychlosti, letecký provoz
mm	40 - 300	0,1 - 0,75	Trojrozměrné mapování

Tab. 5-1 Používaná vlnová pásma

V průmyslu je možné využít radarového snímání výšky hladiny. Oproti ultrazvukovým měřičům jsou ty radarové ideální tam, kde velké množství páry, prachu a pěny zabraňuje efektivnímu využití ultrazvuku. [17]



Obr. 5-3 Radarový snímač hladiny

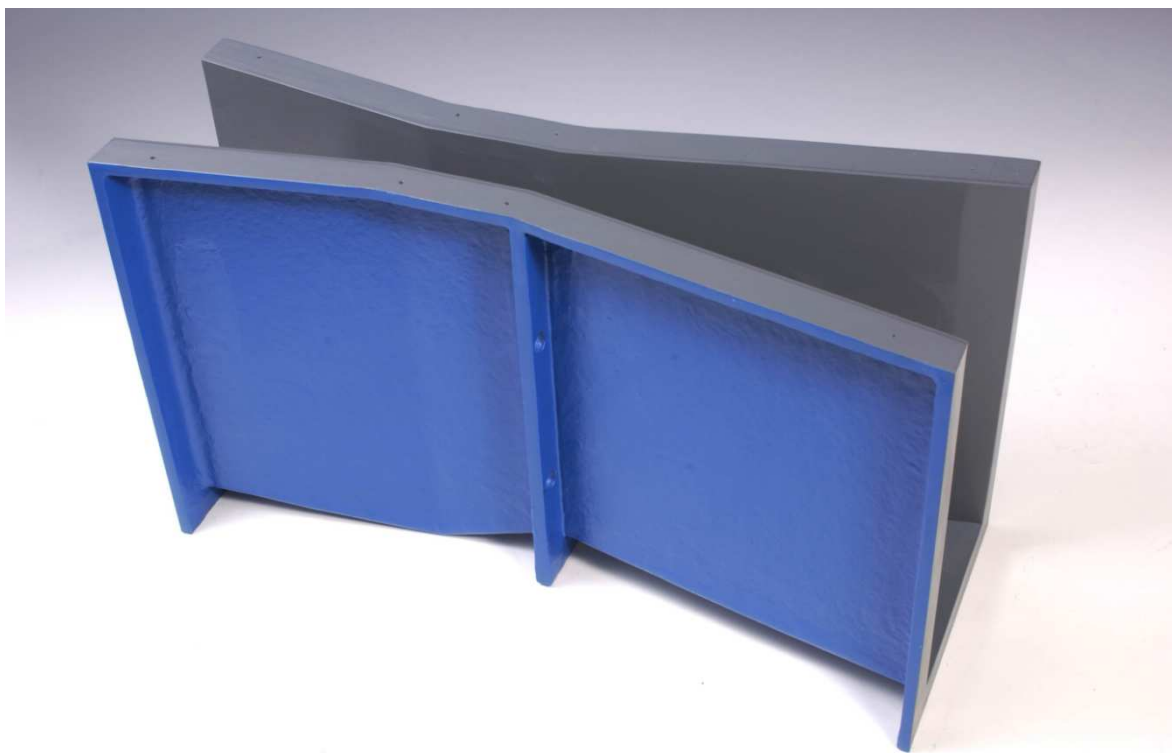
Praktická část

6 Praktická část

6.1 Popis Venturiho žlabu

Praktickou část diplomové práce jsem se zabýval měřením průtoku na modelu otevřeného venturimetru známého také jako Venturiho žlab. Jako měřicí zařízení jsem používal ultrazvukový dálkoměr. [22]

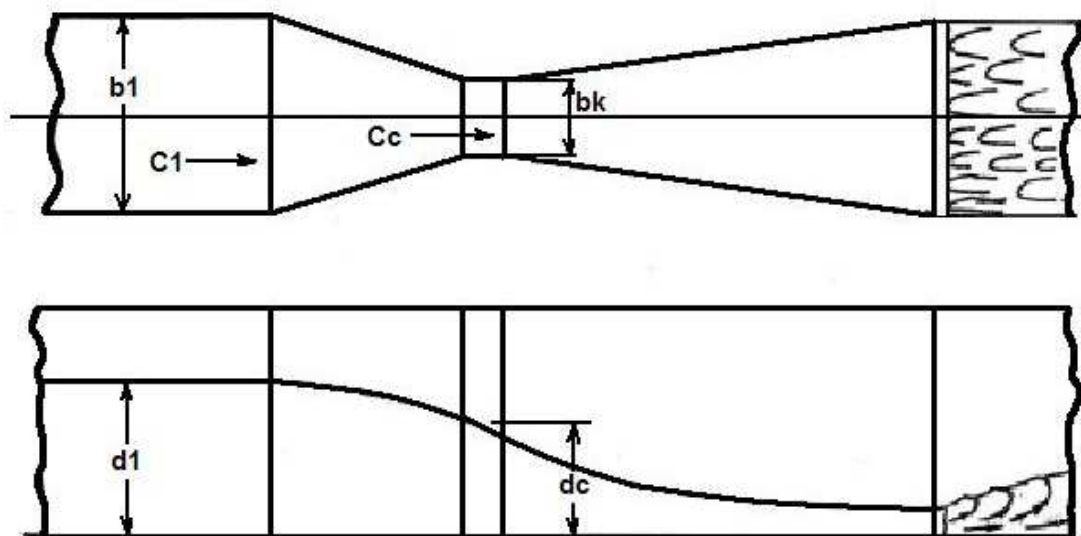
Venturiho žlab je zařízení ve tvaru dýzy s obdélníkovým průtočným průřezem, které svým zužujícím se profilem nutí přejít proudění z říčního (podkritického) na proudění bystřinné (nadkritické). Rozdíl mezi těmito prouděními je ten, že při bystřinném proudění nejsou vlny schopny se šířit proti proudu. Venturiho žlab slouží k měření průtoku kapalin. Lze jej také použít ke ztrátě potenciální energie tam, kde je požadováno snížení úrovně toku kanálu. Venturiho žlab je poměrně přesné zařízení. Je velice odolné proti zanášení a proto zvláště vhodné pro čističky odpadních vod. Jeho výhodou je vysoký měrný rozsah a má také nízkou energetickou ztrátu. Díky své jednoduchosti se snadno instaluje a jeho vestavba nevyžaduje složité stavební úpravy. Měření výšky hladiny se obvykle provádí pomocí vodočtu nebo ultrazvukovou sondou. Za pomoci naměřených údajů je vytvořena konzumční křivka ($Q=f(h)$). Tvar Venturiho žlabu je ukázán na obrázku níže. [22]



Obr. 6-1 Venturiho žlab

6.2 Odvození rovnice pro Venturiho žlab

Na Venturiho žlab, jehož schéma je zobrazeno níže, aplikujeme rovnici měrné energie průřezu, budeme brát oblast před zúžením jako místo jedna a oblast v hrdle, kde dochází ke kritickému proudění jako oblast dvě. [22]



Obr. 6-2 Schéma Venturiho žlabu

Dostaneme tuto rovnici:

$$d_1 + \frac{c_1^2}{2g} = d_2 + \frac{c_2^2}{2g}$$

Protože je v místě 2 kritické proudění víme, že $d_2 = d_c$ a $\frac{c_c^2}{2g} = \frac{d_c}{2}$.

To dosadíme do předchozí rovnice a získáme:

$$d_1 + \frac{c_1^2}{2g} = d_c + \frac{d_c}{2} = \frac{3}{2} d_c$$

Průtok si označíme jako Q a vyjádříme rychlost c_1 :

$$c_1 = \frac{Q}{d_1 b_1} = \frac{b_c d_c \sqrt{g d_c}}{d_1 b_1}$$

Rovnici pro rychlost c_1 dosadíme a získáme:

$$d_1 + \frac{1}{2g} \left(\frac{b_c d_c \sqrt{g d_c}}{d_1 b_1} \right)^2 = \frac{3}{2} d_c$$

Po úpravě:

$$d_1 + \frac{1}{2g} \left(\frac{b_t}{d_1} \cdot \frac{d_c}{b_1} \right)^2 g d_c = \frac{3}{2} d_c \text{ a poté } d_1 + \frac{d_c}{2} \left(\frac{b_t}{d_1} \cdot \frac{d_c}{b_1} \right)^2 = \frac{3}{2} d_c$$

Po zjednodušení dostaneme:

$$d_1 + \frac{1}{2} \left(\frac{b_t}{d_1} \right)^2 \cdot \frac{d_c^3}{b_1^2} = \frac{3}{2} d_c$$

Tento vztah násobíme $\frac{d_1^2}{b_c^3}$ a získáme finální podobu:

$$\left(\frac{d_1}{d_c} \right)^3 + \frac{1}{2} \left(\frac{b_t}{d_1} \right)^2 = \frac{3}{2} \left(\frac{d_1}{d_c} \right)^2$$

Z tohoto konečného vztahu vyplývá, že poměr před zúžením a v zúžení je stálý pro daný žlab, stejně jako poměr hloubky přítoku ke kritické hloubce v hrdle. Díky tomu můžeme vypočítat průtok z hloubky před zúžením.

Z předešlých rovnic již známe tu pro průtok.

$$Q = b_t d_c \sqrt{g d_c}$$

Upravíme tak, aby v rovnici figurovala d_1 :

$$Q = b_t \frac{2}{3} d_1 \sqrt{g \frac{2}{3} d_1}$$

Další úpravou získáme:

$$Q = b_t d_1^{\frac{3}{2}} \frac{2}{3} \sqrt{g \frac{2}{3}}$$

Konečná forma rovnice pro výpočet průtoků je pak:

$$Q = 1.705 \cdot b_t \cdot d_1^{\frac{3}{2}}$$

6.3 Popis modelu Venturiho žlabu

Měření probíhalo na modelu Venturiho žlabu, který tvarově přibližně odpovídal žlabům používaným v komerční sféře. Koryto modelu je vyrobeno z průhledného plexiskla, přičemž jednotlivé části jsou k sobě přišroubovány a slepeny. Profil dýzy je vytvořen dvěma tvarovanými plechy, které jsou přilepeny ke stěnám a dnu koryta. Na jednom konci je žlab zaslepen a je zde upevněn přívod vody. Aby byl průtok korytem klidný je voda usměrněna za pomoci vložené přepážky. Druhý konec koryta je volně otevřený a umožňuje volný odtok vody. Celý žlab je upevněn na kovových nohách, které umožňují manipulaci se sklonem žlabu. Celé toto zařízení má délku 1200 mm. Výška kanálu je 105 mm a jeho šířka 65 mm. Dýza je vzdálena 600 mm od přívodu vody. Samotná dýza má standardní velikost je 200 mm dlouhá a její hrdlo je široké 15 mm.



Obr. 6-3 Model Venturiho žlabu



Obr. 6-4 Tvar dýzy

6.4 Popis měřících přístrojů

Při měření jsem využíval kovového pravítka pro přesné změření výšky, dvanácti litrovou nádobu pro kontrolní výpočet průtoku a ultrazvukový dálkoměr pro bezkontaktní měření výšky hladiny. Pro kontrolu ultrazvukového dálkoměru jsem použil svinovací metr.

K dispozici pro bezkontaktní měření hladiny jsem měl ultrazvukový dálkoměr Sonic Tape. Tento přístroj slouží k pohodlnému a rychlému měření vzdálenosti. Pro snadné zaměření měřeného objektu je tento dálkoměr vybaven laserovým paprskem. Přístroj umožňuje měření v metrech nebo ve stopách. Také obsahuje funkce pro rychlý výpočet plochy a objemu, které jsem však nepoužil. Pro změření vzdálenosti je třeba zaměřit dálkoměr na cíl pomocí laserového paprsku. Je třeba přitom dbát, aby byl přístroj zaměřen kolmo na daný objekt, jinak display zobrazí nápis „error“. Přístroj má rozsah od 0,6 m do 15m a je napájen devíti voltovou baterií. Ultrazvukový dálkoměr je zobrazen na obrázku níže.



Obr. 6-5 Popis přístroje



Obr. 6-7 Popis přístroje

6.5 Postup měření

Při samotném měření jsem postupoval následovně. Nejprve jsem vyrovnal model Venturiho žlabu do roviny za pomoci stavitelných nožek. Tento konkrétní ultrazvukový dálkoměr začíná měřit vzdálenost od 60 cm. Proto jsem ho za pomoci kovové konstrukce a izolační pásky upevnil ve vzdálenosti 70 cm ode dna žlabu. Jako měřicí bod jsem určil místo vzdálené 15 cm před začátkem dýzy. Toto místo měření jsem zvolil, protože zde byl již tok klidný a i dle nalezených informací lze u Venturiho žlabu měřit ve vzdálenosti od trojnásobku předpokládané hloubky daného toku. Dále jsem připojil přívod vody a pod otevřený konec žlabu jsem umístil nádobu, na které jsem si naznačil rysku pro objem 12 litrů. Postupně jsem zvyšoval průtok vody a stopoval, za jak dlouho se mi naplní odměrná nádoba. Také jsem současně měřil výšky v měrném bodě za pomoci kovového pravítka a ultrazvukového dálkoměru. Přestože byl však dálkoměr přesně zaměřen pomocí laserového paprsku, přístroj nereagoval na změnu výšky hladiny a ukazoval hodnotu, která odpovídala přibližně středu výšky žlabu. Problém spočíval v tom, že se ultrazvukové vlny šířili ve tvaru kužele a odrážely se od stěn žlabu. Tento problém jsem vyřešil vytvořením polystyrénového plováku, který vyčníval nad úroveň žlabu. Nicméně i toto bylo selhání, protože tento ultrazvukový dálkoměr dokáže měřit pouze v centimetrech a tím pádem neposkytoval dostatečnou přesnost měření. I přes to jsem naměřené hodnoty získané z měření výšky hladiny pravítkem použil pro porovnání s dalším měřením, které jsem provedl po úpravě tohoto žlabu.

Číslo měření	1	2	3	4	5	6
Objem nádoby (m^3)	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
Výška hladiny (m)	0,032	0,044	0,045	0,046	0,047	0,048
Čas(s)	81	48	46	44	43	42
$Q_n(\text{m}^3/\text{s})$	0,000148	0,000250	0,000260	0,000270	0,000279	0,000285
$Q_v(\text{m}^3/\text{s})$	0,000146	0,000236	0,000244	0,000252	0,000260	0,000268

Tab. 6-1 Naměřených hodnot

$$Q_n = \frac{dV}{dt} (m^3 / s)$$

$$Q_v = 1.705 \cdot b_t \cdot d_1^{\frac{3}{2}}$$

Kde Q_v je průtok vypočtený dle rozměrových parametrů Venturiho žlabu a Q_n je průtok vypočtený za pomoci odměrné nádoby. Sestrojil jsem konzumční křivky pro obě hodnoty Q_v a Q_n .



Graf. 6-1 Konzumční křivka pro hodnoty Q_n



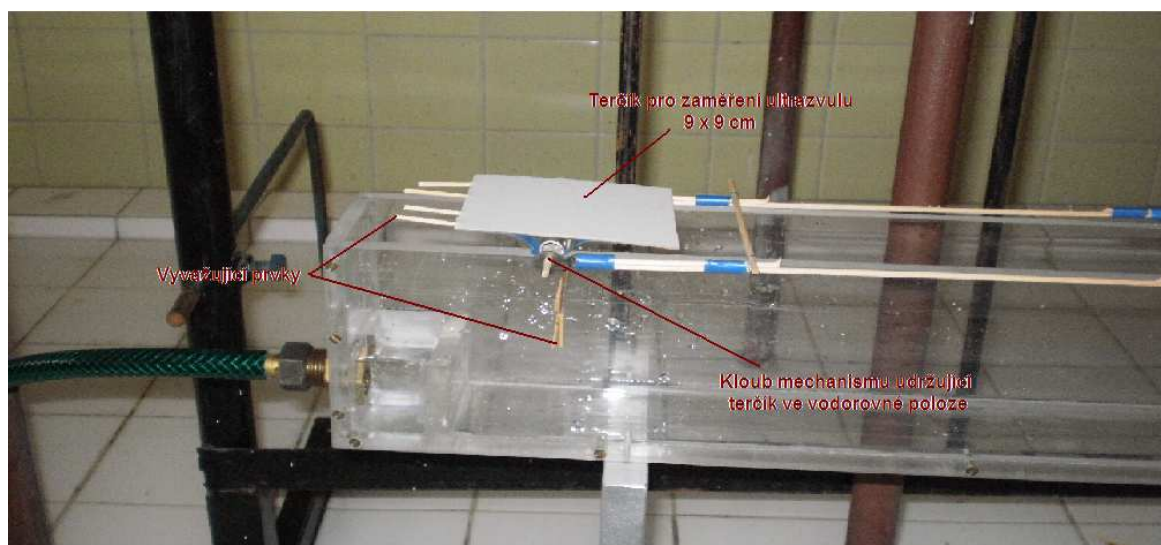
Graf. 6-2 Konzumní křívka pro hodnoty Q_v

Z grafů je patrné, že obě konzumní křívky jsou si velmi podobné. Obě mají přibližně lineární průběh. Odchylka naměřených a vypočtených hodnot by se pravděpodobně dala snížit použitím větší odměrné nádoby.

Nedostatečnou přesnost ultrazvukového dálkoměru jsem vyřešil dřevěnou konstrukcí. Ta využívá vlastnosti páky tak, že i menší vychýlení plováku je možno díky ní změřit. Na stavbu této lehké konstrukce jsem použil dřevěné špejle, izolační pásku, tenký drát, lepidlo, kartonový papír a staré klíče od zámku, které svým tvarem a velikostí vhodně posloužili pro vytvoření kloubu. Konec páky jsem musel vybavit vyváženým terčíkem, který musel být neustále ve vodorovné poloze, aby bylo možno správně odečíst vzdálenost. Ultrazvukový dálkoměr jsem upevnil ke konstrukci pomocí izolační pásky a to ve vzdálenosti 80 cm od terčíku. Délka celé páky je 55cm, přičemž plovák ji zdvihá v místě měřicího bodu tedy 15 cm od kloubu. Jak tato konstrukce vypadá, je zobrazeno na obrázcích níže.



Obr. 6-8 Popis vyrobené konstrukce



Obr. 6-9 Popis vyrobené konstrukce



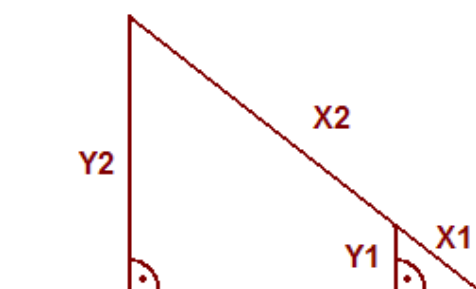
Obr. 6-10 Upevnění ultrazvukového dálkoměru

Naměřené a vypočtené hodnoty jsem zpracoval do tabulky.

Číslo měření	1	2	3	4	5	6
Objem nádoby (m^3)	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012	0,012
Výška hladiny (m)	0,026	0,032	0,037	0,043	0,048	0,053
Zdvih páky (m)	7	9	11	13	15	17
Čas(s)	111	80	64	50	42	36
$Q_n(\text{m}^3/\text{s})$	0,000108	0,000150	0,000187	0,000240	0,000285	0,000333
$Q_v(\text{m}^3/\text{s})$	0,000107	0,000146	0,000182	0,000228	0,000269	0,000312

Tab. 6-2 Naměřených hodnot

Naměřené hodnoty zdvihu páky jsem přepočtl na výšku hladiny na základě podobnosti dvou trojúhelníků. Také jsem musel k výšce hladiny připočíst vzdálenost 7 mm, což byla přibližná hloubka, do které byl plovák vtlačen pod úroveň hladiny.



Obr.6-11 Podobnost dvou trojúhelníků

Na základě podobnosti dvou trojúhelníků 1 a 2 se velikost zdvihu plováku Y1 vypočítá dle následujícího vztahu.

$$\frac{X1}{Y1} = \frac{X2}{Y2} \rightarrow Y1 = \frac{X1 \cdot Y2}{X2}$$

Výška hladiny h je potom:

$$h = Y1 + 0,007$$



Graf 6-3 Konzumní křivka pro hodnoty Q_n



Graf 6-4 Konzumní křivka pro hodnoty Q_v

6.6 Zhodnocení výsledků

Obě konzumní křivky jsou si opět velmi podobné. Z průběhů křivek je také patrné, že závislost průtoku na výšce hladiny byla stejná jak při měření výšky hladiny pravítkem, tak i při použití pomocné konstrukce a ultrazvukového dálkoměru.

Je však třeba podotknout, že přestože se sestavený model projevil jako funkční, v reálné situaci by ho nebylo zapotřebí. Pokud již použijeme plovák, je výhodnější mechanismus s převody a nějakým elektronickým detekčním systémem. Nicméně zvláště pro měření průtoku v čističkách odpadních vod by plovák nepochybně měl výhodu odolnosti Venturiho žlabu proti zanášení. V případě použití ultrazvukového dálkoměru by při větším měřítku odpadl problém úzkého koryta. Také by v tomto případě pravděpodobně pro většinu aplikací stačila rozlišovací schopností 1 cm.

7 Závěr

V diplomové práci se snažil popsat vybrané bezkontaktní metody pro základní procesní veličiny.

Na začátku jsem popsal základní princip Dopplerova jevu. Dále jsem se rozepsal o způsobu činnosti měření rychlosti proudění za pomoci LDA. Také jsem odvodil rovnice, které přispívají k pochopení této metody.

V dalších kapitolách jsem se zabýval bezkontaktním měření teploty. Popsal jsem základní principy a provedl rozdělení jednotlivých měřících přístrojů podle způsobu určování teploty měřeného objektu.

Poté jsem zpracoval způsoby měření ultrazvukem. Popsal jsem jednotlivé metody využívající ultrazvukového vlnění a ukázal možnosti vhodného rozmístění senzorů pro měření průtoku v korytech i trubkách. Také jsem se zabýval možností měření výšky hladiny. Stručně jsem popsal radar, jeho princip a jeho široké možnosti využití v mnoha oblastech

V praktické části diplomové práce jsem prováděl měření průtoku na Venturiho žlabu za pomoci ultrazvukového dálkoměru. Pro účely měření jsem zhotovil dřevěnou konstrukci, která mi umožnila zvýšit přesnost ultrazvukového dálkoměru, kterého jsem měl k dispozici.

8 Seznam použité literatury

- [1] Durst, R., Melling, A., Whitelaw, J. H.: Principles and practise of laser Doppler anemometry. New York, Academics Press 1981, ISBN 0- 12-225260-8
- [2] Studijní materiály z <http://www.fce.vutbr.cz/VST/lvv/index.html>
- [3] Údaje ze stránky <http://www.vidix.se/>
- [4] Údaje ze stránky <http://cs.wikipedia.org/>
- [5] Dokument ze stránky physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/mereni_318.pdf
- [6] Údaje ze stránky www.it.cas.cz/~uruba/docs/ZIE/LDA.pdf
- [7] Údaje ze stránky web.mit.edu/fluids-modules/www/exper.../LDA.text.pdf
- [8] Údaje ze stránky <http://www.vscht.cz/ufmt/kadleck.html>
- [9] Údaje ze stránky www.spszl.cz/
- [10] Dokument ze stránky <http://theses.cz/>
- [11] Dokument ze stránky www3.fs.cvut.cz/web/fileadmin/documents/12241.../2001/ms01-piv.pdf
- [12] Údaje ze stránky <http://www.mmspektrum.com>
- [13] Údaje ze stránky www.edumat.cz/texty/teplota.pdf
- [14] Údaje ze stránky www.infrared.cz/Technologie/Termovize/
- [15] Údaje ze stránky www.quantum-hydrometrie.de/mereni_prutoku_ultrazvukem_cz.pdf
- [16] Údaje ze stránky www.dhi.cz/monitoring/.../clanek_nivus_a_krizova_korelace.pdf
- [17] Údaje ze stránky <http://www.odbornecasopisy.cz/?cil=home>
- [18] Údaje ze stránky <http://www.omegaeng.cz/>
- [19] Údaje ze stránky <http://www.automatizace.cz/index.php>
- [20] Údaje ze stránky www.army.cz/images/id_8001_9000/.../radar/k23.htm
- [21] Údaje ze stránky press.amic.cz/content/image.php?uid=47cd1e9a810a0
- [22] Údaje ze stránky <http://www.ivorbittle.co.uk/>

9 Seznam použitých symbolů

symbol	význam	jednotka
ρ	hustota	$[\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}]$
λ	vlnová délka	$[\text{m}]$
b	šířka	$[\text{m}]$
c	rychlost světla ($c = 299792485 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
c	rychlost	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$
d	vzdálenost	$[\text{m}]$
f_d	dopplerova frekvence	$[\text{Hz}]$
g	gravitační zrychlení (9,81)	$[\text{m} \cdot \text{s}^{-2}]$
h	Planckova konstanta ($h = 6,6260755 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)	$[\text{J} \cdot \text{s}]$
H	intenzita vyzařování	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$
h	výška	$[\text{m}]$
k	Boltzmannova konstanta ($k = 1,380658 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$)	$[\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}]$
p	tlak	$[\text{Pa}]$
Q	průtok	$[\text{m}^3/\text{s}]$
t	čas	$[\text{s}]$
T	teplota	$[\text{K}]$
ε	spektrální emisivita měřeného objektu	$[-]$
σ	Stefanova-Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$)	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$